

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDOS SOBRE A CONFIGURAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS:
AVALIAÇÃO DE DIVERSOS ALGORITMOS E NOVAS
PROPOSIÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO EM TEMPO REAL

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

ÁLVARO ISMAEL MURCIA CABRA

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 1988

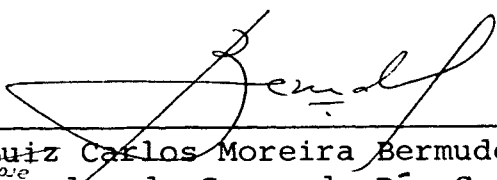
ESTUDOS SOBRE CONFIGURAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS::
AVALIAÇÃO DE DIVERSOS ALGORITMOS E NOVAS
PROPOSIÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO EM TEMPO REAL

Álvaro Ismael Murcia Cabra

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM
SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

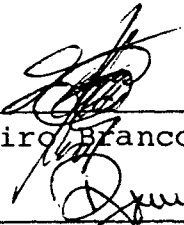


Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.
ORIENTADOR

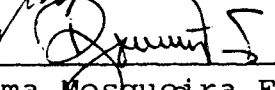


Prof. Luiz Carlos Moreira Bermudez, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES



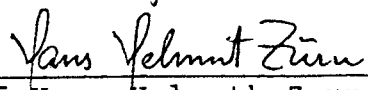
Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.



Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.



Prof. Hans Helmuth Zurn, Ph.D.



Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

A minha esposa Maria Eligad
Aos meus filhos David Andrés
e Juan Felipe.

Aos meus Pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luiz Jairo Branco Machado, pela orientação e apoio sem o qual não teria sido possível a conclusão deste trabalho.

Ao Eng. Eduardo Lopes Teixeira e sua esposa Cristina pela amizade e pelo grande incentivo transmitido durante a realização do Curso CCSE-85.

Aos colegas e professores do Curso CCSE-85 pela ajuda e estímulo em momentos cruciais.

Agradeço também aos Engs. José Vicente Camargo e Adriano Peña pelo apoio para que o presente trabalho viesse a ser concluído.

Ao Eng. Fernando Aljure pela colaboração na fase final deste trabalho.

Ao LABSPOT do Departamento de Engenharia Elétrica coube um papel fundamental, o qual consistiu no suporte técnico e fundamental, sem o qual este trabalho não poderia ter sido concluído em tempo.

À ELETROSUL pelo fornecimento dos dados da Rede interligada do Sul do Brasil.

Finalmente agradeço à UFSC, à ISA, à ELETROBRÁS e à CAPES pelos suportes técnicos e financeiros respectivamente.

SUMÁRIO

RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
RESUMEN	xv
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
1.1 - Operação dos Sistemas de Potência.....	01
1.2 - Breve Descrição do problema da Configuração da rede em Sistemas de Potência.....	02
1.3 - Revisão Bibliográfica referente à Configuração de Subestações e de Rede.....	04
1.4 - Contribuições deste trabalho.....	09
1.5 - Organização deste trabalho.....	10
CAPÍTULO II - ASPECTOS GERAIS DA CONFIGURAÇÃO DE REDE NA ANÁLISE DE SEGURANÇA DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA	
2.1 - Objetivos do Capítulo.....	12
2.2 - Redes Elétricas de um Sistema de Potência.....	12
2.2.1 - Classificação das Redes do ponto de vista da decomposição Física.....	14
2.2.2 - Classificação das Redes do ponto de vista da Cadeia Informática para a Opera- ção em Tempo Real.....	16
2.3 - Estados da Operação de um Sistema de Potência.....	17
2.4 - Funções de Controle da Operação dos Sistemas de Potência.....	18

2.5 - O Configurador e as Funções da Operação em Tempo Real.....	22
2.5.1 - Função de Monitoração da Rede em Tempo Real.....	22
2.5.2 - Função da Análise de Contingências para a Análise de Segurança em Tempo Real.....	24
2.5.3 - Função do Despacho de Geração da Análise de Segurança para a Operação em Tempo Real.....	25
2.6 - O Configurador da Rede e as Funções Previsionais.	25
2.7 - Conclusões deste Capítulo.....	26

CAPÍTULO III - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DA CONFIGURAÇÃO DA REDE

3.1 - Objetivos do Capítulo.....	27
3.2 - Breve História da Teoria dos Grafos.....	27
3.3 - Revisão Matemática da Teoria dos Grafos. Definições.....	29
3.3.1 - Tipo de Grafos.....	29
3.3.2 - Tipos de Representação usuais de um Grafo	38
3.3.3 - Conexidade de um Grafo.....	44
3.3.4 - Árvores.....	47
3.4 - O Problema do Configurador da Rede. Formulação Matemática.....	50
3.5 - Conclusões deste Capítulo.....	52

**CAPÍTULO IV - ALGORITMOS MATEMÁTICOS APLICÁVEIS À
SOLUÇÃO DO PROBLEMA DO CONFIGURADOR
DA REDE.**

4.1 - Objetivos do Capítulo.....	53
4.2 - Algoritmos que se utilizam da Representação por meio de listas.....	54
4.2.1 - Algoritmo de Paton ou Algoritmo dos Circuitos Fundamentais.....	54
4.2.2 - Algoritmo de Dijkstra.....	56
4.2.3 - Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora.	57
4.2.4 - Algoritmo de Configurador de Rede baseado na técnica de passeio pelos arcos.....	59
4.3 - Algoritmos para a Representação por meio da Ma- triz de Adjacências.....	62
4.3.1 - Algoritmo das Multiplicações Sucessivas da Matriz de Adjacências.....	62
4.3.2 - Algoritmo de contração de vértices adja- centes.....	63
4.4 - Análise dos Algoritmos apresentados e escolha dos Algoritmos a implementar.....	66
4.4.1 - Algoritmos que usam a Representação por meio de listas e a técnica de visita aos vértices.....	67
4.4.2 - Algoritmos que usam a Representação por meio de listas e a técnica de passeio pelos arcos.....	68

4.4.3 - Algoritmos que usam a Representação por meio da Matriz de Adjacências.....	69
4.5 - Conclusões deste Capítulo.....	71

CAPÍTULO V - DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA ATRAVÉS DO COMPUTADOR

5.1 - Objetivos do Capítulo.....	72
5.2 - Base de Dados para um Sistema de Potência.....	73
5.2.1 - Estrutura da Base de dados escolhida para este trabalho.....	74
5.3 - Configuradores de Subestações desenvolvidos....	84
5.3.1 - Programa Configurador de Subestações baseado nos algoritmos que utilizam a técnica de Visita aos Vértices.....	84
5.3.2 - Programa Configurador de Subestações baseado no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora.....	93
5.3.3 - Programa Configurador de Subestações baseado no Algoritmo de contração de vértices adjacências.....	99
5.4 - Configuradores de Rede desenvolvidos.....	104
5.5 - Conclusões deste Capítulo.....	104

CAPÍTULO VI - RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

6.1 - Objetivos do Capítulo.....	105
6.2 - Descrição de um Conjunto de Redes de Referências Utili- zadas para Testes dos Configuradores.....	106
6.3 - Descrição do Sistema Exemplo Didático.....	108
6.3.1 - Diagrama Unifilar para o Sistema Exemplo Didático.....	109
6.3.2 - Diagrama dos arranjos das Subestações do Sistema Exemplo Didático.....	109
6.3.3 - Representação no computador do Siste- ma Exemplo Didático.....	110
6.4 - Dados de Saída dos Configuradores para o Sistema Exemplo Didático.....	112
6.4.1 - Resultados do Configurador de Subesta- ções.....	112
6.4.2 - Resultado do Configurador de Rede....	114
6.4.3 - Resultado à saída do Programa Configu- rador de Rede. Sistema Exemplo Didá- tico.....	115
6.5 - Diagramas Unifilares.....	116
6.5.1 - Diagrama Unifilar do Sistema Oito Barras extraído do Sistema Elétrico da Colômbia.....	116
6.5.2 - Sistema Teste utilizado por Sullivan e outros [4].....	118

6.5.3 - Sistema Teste utilizado por Bezerra e outros [22].....	119
6.5.4 - Sistema de referência IEEE 14 Barras..	120
6.6 - Tempos de Resposta dos testes para cada um dos programas implementados.....	121
6.6.1 - Tempos totais de Resposta dos Configuradores de Subestações em milésimas de segundo (modo Inicialização).....	123
6.6.2 - Tempos de Resposta dos Configuradores de Rede em milésimas de segundo.....	124
6.6.3 - Tempos dos Configuradores de Subestações para a Subestação Salto Osório em milésimas de segundo.....	126
6.6.4 - Configuradores funcionando no Modo Atualização.....	127
6.7 - Discussão dos Resultados.....	128
6.8 - Conclusões deste Capítulo.....	130
 CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	
7.1 - Conclusões finais.....	133
7.2 - Sugestões para futuros Trabalhos.....	134
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

APÊNDICE A	- PRINCIPAIS DEFINIÇÕES, CONCEITOS E TERMINOLOGIAS ADOTADAS NO PRESENTE TRABALHO.....	141
APÊNDICE B	- PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA CARREGAR A BASE DE DADOS ESTÁTICA.....	145
	B.1 - Dados de Entrada.....	146
	B.2 - Diagrama de Fluxo do programa para carregar a Base de dados Estática.....	147
	B.3 - Dados de Saída do programa...	149
APÊNDICE C	- REDE 500/230 KV DO SUL DO BRASIL	
	C.1 - Objetivos do Apêndice.....	150
	C.2 - Diagrama Unifilar da Rede 500/230 do Sul do Brasil.....	151
	C.3 - Diagrama Unifilar das Subestações Salto Osório e Areia....	152
	C.4 - Dados de entrada para carregar a Base de Dados Estática da Rede 500/230 do Sul do Brasil.	154

RESUMO

Neste trabalho é revisado o problema da Configuração da Rede Elétrica que é de vital importância para os Centros de Controle dos Sistemas de Potência.

Inicialmente são apresentadas as Funções de Controle dos Sistemas de Potência e a atuação do Configurador em cada uma delas.

Uma revisão matemática permite mostrar a aplicação da Teoria dos Grafos ao problema da Configuração da Rede e vislumbrar seis possíveis caminhos para resolver o problema. Destes caminhos, foram eleitos três, mediante critérios de rapidez, necessidade de armazenamento e facilidade de programação.

Para estes três algoritmos foram construídos três programas que visam a configuração de subestações e três que visam a configuração global da rede. Estes programas foram desenvolvidos incorporando alternativas que são requeridas para que possam vir a trabalhar em qualquer Centro de Controle. Dentre os algoritmos destacam-se dois que até onde se sabe, são apresentados pela primeira vez na literatura pertinente.

Para testar e comparar a eficiência dos métodos foram realizados testes sobre o computador IBM-4341 da UFSC, envolvendo redes testes típicas e duas redes associadas aos sistemas da ISA (Interconexión Electrica S.A. Colômbia) e da ELETROSUL (Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A.).

ABSTRACT

This work presents a review related to the problem of Electric Network Configuration which is of vital importance for the Power Utility Control Centers.

First, the Control Functions of Eletrical Power Systems are presented as well as the Network Topology Configurator for each of them.

A mathematical review allows to show application of Graph Theory to the problem of Network Configuration, and from this six possible ways of solution are envisaged. Only three of them were chosen based on speed, storing needs and ease of programming criteria.

For these algorithms, three programs were written that realize the global configuration of the network. These programs were developed so as to take alternatives into account that could be required in any Control Center. Of these algorithms, two deserve special attention, for as far as is known, they are presented for the first time in the related literature.

To test and compare efficiency of the methods, tests were made on an IBM-4341 computer at UFSC involving typical sample networks related to ISA (Interconexion Eléctrica S.A) and ELETROSUL (Centrais Elétricas do Sul do Brasil) respectively.

RESUMEN

En este trabajo se revisa el problema de la Configuración de las Redes Eléctricas, de vital importancia para los Centros de Control de los Sistemas de Potencia.

Inicialmente se presentan las Funciones de Control de los Sistemas de Potencia y la actuación del Configurador en cada una de ellas.

La aplicación de la Teoría de Grafos al problema de la Configuración de la Red permite determinar seis caminos posibles para resolver el problema. De estos caminos, se seleccionaron tres, desde el punto de vista de rapidez, necesidad de almacenamiento y facilidad de programación.

Para estos tres algoritmos se escribieron seis programas, tres que efectúan la Configuración de Subestaciones y tres que efectúan la Configuración global de la Red. Estos programas fueron desarrollados incorporando las alternativas necesarias para que puedan trabajar en cualquier Centro de Control. De estos algoritmos se destacan dos que hasta donde se sabe, son presentados por primera vez en la literatura pertinente.

Para probar y comparar la eficiencia de los métodos fueron realizadas pruebas en el computador IBM-4341 de la UFSC, sobre redes típicas presentadas en la literatura pertinente y dos redes reales de los Sistemas de ISA (Interconexión Eléctrica S.A. Colômbia) y ELETROSUL (Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A.).

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

A partir dos anos 60 começou-se a notar a necessidade de automatizar a operação dos Sistemas de Potência devido ao fato de que as redes se tornaram tão grandes e complexas que não era razoável esperar que o operador pudesse analisar um volume tão grande de informação e tomar uma decisão com a rapidez e confiabilidade requerida. Foi assim que, com o desenvolvimento dos recursos de cálculo, começaram a ser desenvolvidos programas para computador, os quais eram inicialmente projetados para rodar em modo "off-line", tendo como finalidade ajudar o operador em suas tarefas.

Na atualidade o crescente impacto das ferramentas computacionais, aliado ao aperfeiçoamento dos sistemas de controle e de telecomunicações, tem permitido o desenvolvimento de cadeias de programas que, baseados num sistema de aquisição de dados automático, rápido e confiável (SCADA), rodam em modo de Tempo Real (Monitoração da Rede), ou em modo estudo de tempo real (Análise de Contingências e Despacho da Geração) ou ainda em modo estudo de planejamento (Funções Previsionais). Tais cadeias de programas devem estar habilitadas a fornecer as soluções que o operador necessita a todo momento. Dentro destas cadeias de programas cada

Função do Controle da Operação em Tempo Real da Rede deve ser projetada para desenvolver, com rapidez e eficiência, uma tarefa específica, de modo que a solução global do problema seja entregue ao operador no menor tempo possível e com a confiabilidade que é requerida, subsidiando suas decisões.

1.2. BREVE DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DA CONFIGURAÇÃO DA REDE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Qualquer que seja a Função do Controle da Operação do Sistema de Potência em Tempo Real (Monitoração, Análise de Contingências ou Despacho da Geração) que se deseja realizar, a cadeia de tratamento a ser implementada deve obrigatoriamente começar a partir de uma configuração completa e atualizada da rede, permitindo a obtenção do modelo atualizado do sistema elétrico.

A configuração completa da rede, por questão de modularidade, é classicamente dividida em dois passos: o primeiro trata de obter a configuração de cada subestação do sistema e o segundo trata da configuração da rede global. A configuração de subestações se baseia nos estados dos Dispositivos Lógicos (ver Apêndice A) atualizados pelo sistema de aquisição de dados em tempo real (SCADA) e sempre deve ser refeita quando é constatada uma mudança na situação destes Dispositivos.

Uma modificação da situação de um Dispositivo Lógico pode ocorrer a qualquer instante e pode ter os seguintes efeitos sobre a rede:

- a) Elementos da rede podem ser conectados ou desconectados;

- b) Subestações mudam de configuração, alterando o número de barras da Rede para mais ou menos e
- c) O sistema interconectado pode separar-se em várias áreas, para as quais é possível rodar um fluxo de carga ou fazer Estimacão de Estado.

Um exemplo ilustrativo de uma situação de mudança é mostrado na figura 1.1 (b), onde a abertura dos quatro Dispositivos Lógicos indicados, da subestação representada em 1.1 (a), divide a mesma em duas barras elétricas (ver Apêndice A) com o resultado sendo o aumento na ordem do grafo da Rede.

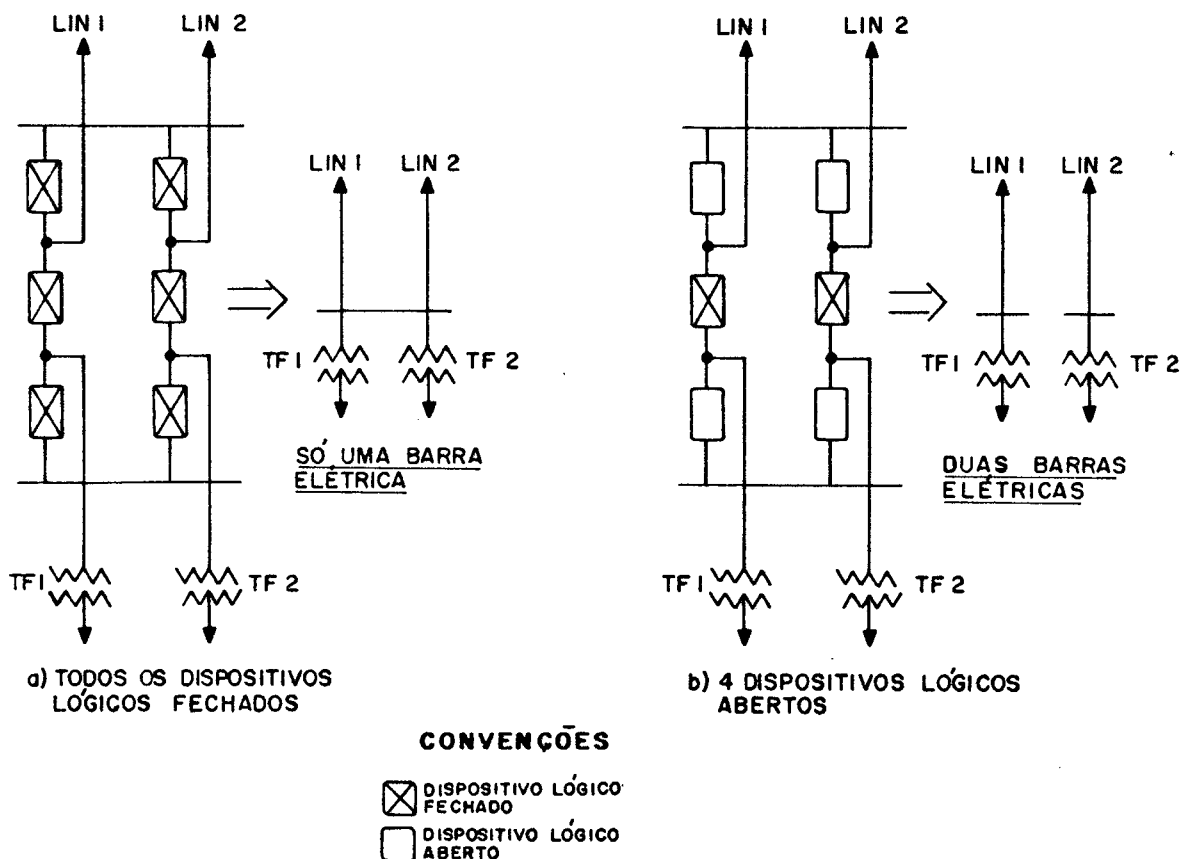


Figura 1.1. Exemplo da modificação da topologia de uma subestação associada a uma mudança de Dispositivos Lógicos.

Pode-se igualmente imaginar uma alteração da mudança apresentada na figura 1.1, onde se passaria inversamente da situação (b) para a situação (a), resultando a alteração do número de barras de 2 para 1, com um correspondente decréscimo do número de barras da rede elétrica.

Uma vez ocorrida uma mudança na topologia da rede de transmissão do sistema, é fundamental que esta mudança seja acompanhada de uma atualização da configuração da rede, pois caso contrário, as decisões do operador, baseadas numa falsa topologia podem implicar em decisões erradas, as quais podem conduzir a situações perigosas de consequências imprevisíveis para o estado da operação do Sistema. Além disso, como a topologia errada será fornecida para outros tratamentos posteriores, pode-se concluir que todos os resultados baseados nesta topologia estarão comprometidos e serão suspeitos. A detecção de erros de topologia, portanto, é vital [28] , [32] e [33].

A Teoria de Grafos [03], [11] a [16] e [25] é a ferramenta matemática que parece ser a mais indicada para resolver o problema da obtenção da configuração topológica das redes elétricas. No capítulo IV se apresentam algumas técnicas derivadas, de modo mais ou menos direto, desta teoria, e que podem ser usadas para a solução do problema.

1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA REFERENTE À CONFIGURAÇÃO DE SUBESTAÇÕES E DE REDE

Dentro do limitado universo das informações obtidas, constata-se que as primeiras referências diretas sobre a questão da configuração da rede elétrica em tempo real foram feitas por Dy

Lyacco e Kraymak [1] em 1969. Naquele trabalho, os citados autores se referiam às dificuldades que se apresentavam à operação durante os momentos de falhas em componentes dos sistemas elétricos de potência, onde muitas informações se concentram, com efeito inclusive bloqueador da reação do operador, em momentos em que a rapidez das ações resultantes deveria ser máxima. Este efeito de bloqueio é sobretudo consequência de que, em situações críticas, muitas informações aparecem simultaneamente, ultrapassando a capacidade do operador analisar, no conjunto, o que está acontecendo. A partir destas constatações, os autores detetam como uma necessidade, na operação dos Sistemas de Potência, a atualização dos dados em tempo real com base nas informações sobre a situação dos relês de proteção e dos estados dos Dispositivos Lógicos. Eles propõem o programa "Automatic System Trouble Analysis" (ASTA), que, após uma falha no Sistema de Potência, atualiza o Diagrama da Rede indicando a posição dos Dispositivos Lógicos e identificando os componentes do Sistema que ficaram desligados. Além disso se obteria um diagnóstico da causa exata da falha. A esta época os autores sugeriam que este programa poderia ser a base para futuras implementações de programas de apoio a Operação de Tempo Real.

No final da década de 60, e começo da década de 70, com os primeiros trabalhos sobre Estimação de Estado, começa a ser sentida a necessidade de um procedimento rápido e confiável para a configuração da rede baseado nos estados atualizados dos Dispositivos Lógicos, com o propósito de automatizar totalmente a Função de Monitoração da Rede em Tempo Real (Configuração de Subestações, Configurador da Rede, Observabilidade, Estimação de Estado). É assim que em 1972 Sasson, Ehrmann, Lynch e Van Slych

[2] apresentam um Configurador de Rede, concebido para a Função de Monitoração "on-line" da "American Electric Power" (AEP). Este configurador fornecia a configuração da rede após qualquer mudança de topologia, viabilizando a utilização do fluxo de potência da AEP. Permitia, deste modo, colocar à disposição dos operadores uma ferramenta de análise que levava em conta a topologia atual da rede; isto é, onde a Matriz de Admitância da rede estava sempre sendo atualizada. Estes autores desenvolveram um algoritmo para configurar subestações, partindo dos estados dos Dispositivos Lógicos, o qual é baseado nos algoritmos para a representação do Grafo da rede por meio de listas e que utiliza uma técnica de visita aos vértices. Este algoritmo logo foi adaptado para configurar a rede e tem sido amplamente utilizado [7], [9], [22], [27].

Paralelamente, os matemáticos, por sua vez, continuavam a avançar seus estudos sobre a Teoria de Grafos. Em 1974 a Pretince-Hall publica o livro "Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science" de Narshing Deo [3]. Este livro apresenta diferentes algoritmos para Obtenção da Árvore Geradora de Grafos Não Orientados, o que motivou inicialmente a elaboração do presente trabalho.

Em 1976 Sullivan, Reichert e Saly [4] apresentavam o configurador de redes por eles desenvolvido para a Brown Boveri da Suíça, o qual usava um algoritmo para a representação do Grafo da rede por meio de listas, utilizando uma técnica de passeio pelos arcos do Grafo. Mais tarde, neste trabalho (Capítulo IV), se procura mostrar que esta adaptação foi um pouco infeliz. Neste artigo já se destacava a importância da existência do configurador para a Estimação de Estado, para a Análise de Contingências e para

os Estudos de Curto-Circuito, mas os resultados apresentados pelos autores não servem como referência para qualquer avaliação comparativa.

O trabalho da referência [5] da autoria de Hanson e Bose, apresenta um configurador de rede para ser utilizado na Análise de Contingências. Os autores descrevem a natureza do programa, bem como a técnica de trabalho utilizada. O algoritmo sugerido se baseia também na representação do Grafo da Rede por meio de listas. O programa resultante tem a capacidade de processar todas as mudanças topológicas requeridas por um operador para os estudos da Análise de Contingências, mas novamente não existe nenhuma informação ou menção no sentido de permitir promover comparações entre os resultados obtidos pelos autores e aqueles obtidos em trabalhos anteriores.

Em 1980 Goderya, Metwally e Mansour [6] apresentam um algoritmo de determinação da conectividade baseado em multiplicações Booleanas sucessivas da Matriz de Adjacências por ela mesma. Assim procedendo, três situações podem ocorrer: (a) a matriz resultante fica completamente cheia; (b) a matriz resultante não muda com relação ao resultado anterior ou (c) atinge-se o número máximo de multiplicações sucessivas. Neste artigo foram testados os efeitos das técnicas de armazenamento em bits e de ordenamento ótimo como um tratamento prévio à recorrência ao configurador. Ao final do trabalho seus autores revelam que este método, segundo entendem, será capaz de substituir os métodos que até agora utilizavam a Matriz de Adjacências. Adiante, aqui neste trabalho (Capítulo IV), se mostrará um algoritmo que, embora baseado nesta técnica, apresenta-se mais eficiente.

Betran e Corbella [7] na Espanha apresentaram, num artigo

divulgado em 1982, o trabalho que desenvolveram para o projeto "Computerized Power Network Telecontrol Center" (CONCE) do Centro de Despacho da Empresa Nacional Hidroelétrica de Ribagorzana (ENHER) da Espanha. Nele se considera que o problema da conectividade da rede é um caso especial da conectividade de um Grafo abstrato. O problema é resolvido por meio da técnica de visita aos vértices, para a representação do Grafo da rede por meio de listas.

Na Universidade Nacional da Colômbia Parra e Florez [9] , implementaram, em 1984, um programa de configuração da rede baseado na Matriz de Admitância do sistema. O algoritmo simula a triangularização da matriz, mantendo guardada esta simulação num arquivo para cada subestação. O algoritmo precisa, para melhorar o tempo de resposta, a utilização de rotinas de ordenamento ótimo, as quais devem ser chamadas antes do configurador, o que compromete o tempo de cálculo e torna difícil sua aplicação em Tempo Real.

Em 1984 Bose [8] apresenta a concepção de uma ferramenta que chama de Função para Análise da Rede em ambiente "on-line", onde são modeladas as redes externas para a Análise de Contingências e o Fluxo de Cargas. Nesse artigo é fornecida uma visão dos programas envolvidos, onde figura o configurador de topologia da rede, mas não há maiores detalhes sobre a sua natureza ou concepção.

De 1984 até esta data são muitos os autores, [17], [18], [19], [20], [21] além de outros, que em seus trabalhos, abordando questões como a da Observabilidade, Obtenção dos Modelos Externos, Estimação de Estado, Análise de Contingências, Implantação de novos Centros de Controle da Operação e a implantação de Laboratórios de Simulação de Sistemas de Potência, se referem ao

tema da configuração topológica como uma questão já superada..

Recentemente, Bezerra, Coroa e Sampaio [22] apresentaram um artigo sobre a determinação em Tempo Real da Topologia da rede Elétrica usando a linguagem de programação PROLOG. O algoritmo utilizado por estes autores é o mesmo utilizado por Sasson et al [2]. Concluem que a programação deste Algoritmo por meio da Linguagem PROLOG é simples e de bom desempenho, mas não apresentam resultados conclusivos e, como admitem, falta uma avaliação com problemas de porte real, para determinar o impacto da inovação.

1.4. CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

Podem-se destacar como principais contribuições deste trabalho:

1º) Formalização de uma metodologia para o estudo da Configuração da Rede, através da Teoria dos Grafos;

2º) Implementação de programas para Configuradores de Subestações e de Rede, dentre os três algoritmos que se consideraram mais promissores de um total de seis examinados inicialmente. Dentre estes três algoritmos, destacam-se dois deles que pelo que se sabe são inéditos a nível da aplicação à solução deste tipo de problema;

3º) Os programas desenvolvidos, em número de seis, foram utilizados na solução de vários problemas didáticos e de porte real. Os resultados obtidos foram inteiramente favoráveis, recomendando que tais algoritmos podem substituir com vantagem os Configuradores de redes atuais, principalmente para aplicações em Tempo Real; e

49) Constituem-se um conjunto de exemplos de sistemas típicos que poderão servir de base de referência para futuros estudos.

1.5. ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO

Este Capítulo I apresenta uma breve descrição do problema da Configuração da Rede, assim como uma revisão bibliográfica referente à questão da Configuração de redes e termina apresentando a organização deste trabalho, que é a seguinte:

O Capítulo II apresenta as principais Funções de Controle da Operação dos Sistemas de Potência, mostrando a importância do Configurador da Rede para cada uma delas.

No Capítulo III é realizado uma revisão matemática do problema da configuração da rede. Este capítulo trata das principais formas de representação de Grafos e das definições que costumam ser utilizadas na solução do problema da configuração. O resultado final é a formulação matemática do problema com base na Teoria de Grafos.

O Capítulo IV apresenta os algoritmos fornecidos pela mesma Teoria de Grafos e que são aplicáveis para resolver tal tipo de problema. Esta apresentação está de acordo com a conveniência da representação dos Grafos matematicamente no computador e destaca as principais técnicas utilizadas para obtê-los. Ao final deste capítulo se apresentam as razões que implicaram na escolha dos três algoritmos básicos que foram implementados.

O Capítulo V descreve os seis (6) programas desenvolvidos utilizando três algoritmos básicos escolhidos no Capítulo an-

terior. Começa com uma breve discussão do problema da escolha da Base de dados e mostra, em detalhe, a constituição de uma Base de Dados Hierarquizada, a qual é utilizada pelos programas implementados e que pode servir para orientar a constituição de uma base de dados para o Sistema de Potência como um todo. Por ocasião da descrição da Base de Dados, aproveita-se para discutir as necessidades de armazenamento para cada um dos Algoritmos.

O Capítulo VI mostra os resultados obtidos seguido das discussões pertinentes, amparadas nas comparações de desempenho relativo dos programas. Estes resultados são apresentados para inúmeros exemplos da literatura e também para as redes reais do Sistema Sul do Brasil e do Sistema da Colômbia (dados gentilmente cedidos pela ELETROSUL do Brasil e a ISA da Colômbia). As comparações do desempenho dos programas são feitas com base nos tempos necessários para a construção de uma topologia e nos requisitos de ocupação da memória do computador.

Finalmente o Capítulo VII apresenta as principais conclusões obtidas e as sugestões para futuros trabalhos.

Nos Apêndices seguem:

A - Principais definições, conceitos e terminologias adotadas no presente trabalho.

B - Programa desenvolvido para o carregamento da Base de Dados Estática.

C - Diagrama Unifilar detalhado da topologia da Rede Sul do Brasil e resumo dos Dados para a carga da Base Estática de Dados.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GERAIS DA CONFIGURAÇÃO DE REDE PARA ANÁLISE DE SEGURANÇA DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1. OBJETIVOS DO CAPÍTULO

Este Capítulo tem como objetivo localizar dentre as principais funções automatizadas dos Centros de Operação de Sistema a função do Configurador de Rede.

Inicia, entretanto, apresentando algumas definições básicas, ligadas às classificações usuais das redes elétricas, com a finalidade de garantir uma melhor compreensão do texto.

Finalmente, apresenta a Cadeia Informática para a operação em Tempo Real com ênfase na descrição das Funções Primárias, da Monitoração e Supervisão em Tempo Real e das Funções Avançadas da Análise de Segurança.

2.2. REDES ELÉTRICAS DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

Para assegurar um melhor entendimento das várias Funções que vêm sendo criadas para a operação em Tempo Real dos Sistemas Elétricos é oportuno realizar uma breve revisão dos conceitos fundamentais que estão envolvidos com a definição da rede elétrica propriamente dita.

Seja o seguinte Sistema interligado:

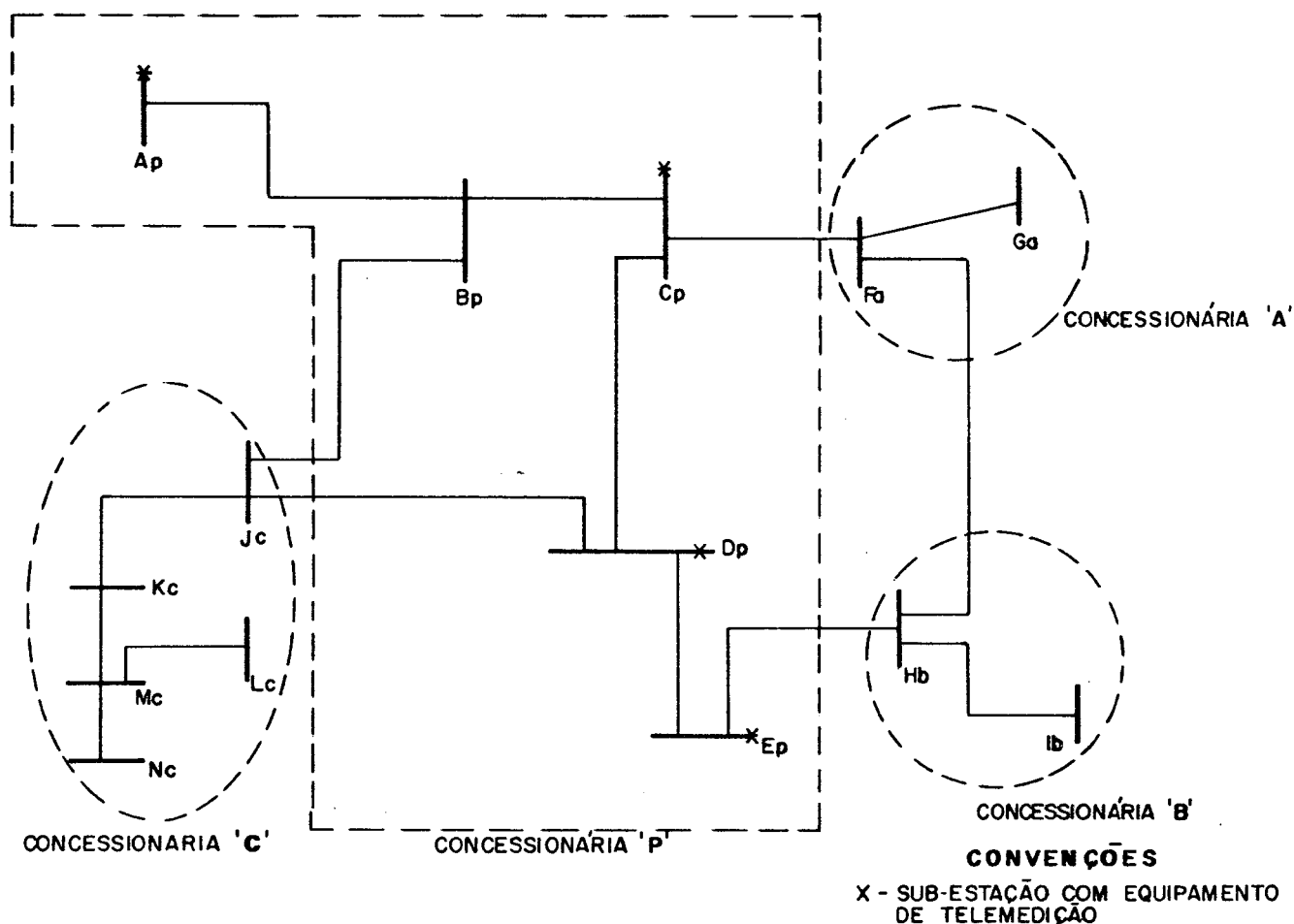


Figura 2.1. Sistema Interligado-Exemplo.

Este Sistema é constituído pelas Concessionárias C_A , C_B , C_C e C_P . Todas as seguintes denominações terão como referência a Concessionária P (própria).

A primeira grande divisão que se pode adotar é a seguinte:

- Classificação das Redes Elétricas do ponto de vista da decomposição Física e
- Classificação das Redes Elétricas do ponto de vista da Cadeia Informática para a Operação em Tempo Real.

A seguir se discutem estas Classificações em mais detalhes.

2.2.1. Classificação das Redes Elétricas do ponto de vista da decomposição Física

As partes de um Sistema de Potência desde o ponto de vista de sua decomposição Física podem ser definidas como:

- a) Rede Interna;
- b) Rede Externa e
- c) Rede Telemedida.

Rede Interna

Rede Interna é a parte da rede interligada que pertence ao Sistema Elétrico que se pretende supervisionar. Na figura 2.1 a Rede Interna da Concessionária P é formada pelas barras $\{A_p, B_p, C_p, D_p, E_p\}$ e pelas linhas que são de sua propriedade. Por conseguinte cada Concessionária terá definido de modo inequívoco a sua própria Rede Interna.

Rede Externa

É a parte da rede interligada que não pertence à Rede Interna. A Rede Externa pode ser constituída pelos elementos do Sistema que pertencem a outras Concessionárias vizinhas, bem como pode ser constituída de elementos do próprio Sistema Interno, que foram definidos como externos por necessidade do projeto de controle. Por exemplo, as sub-redes abaixo de um determinado nível de tensão (69 KV, 13,8 KV etc). Na figura 2.1 a Rede Externa à Conces-

sionária P é formada pelas Barras $\{F_A, G_A, H_B, I_B, J_C, K_C, L_C, M_C, N_C\}$ e pelas linhas de propriedade das Concessionárias A, B, C.

Rede Telemedida

Rede Telemedida é aquela que corresponde ao conjunto das Subestações e linhas de transmissão da Rede Interna nas quais foram instalados Equipamentos de Aquisição de Dados em Tempo Real. Na figura 2.1 se supõe que a Concessionária P instala estes equipamentos nas Subestações A_p, C_p, D_p e E_p . Note-se que não necessariamente a Rede Telemedida cobre toda a Rede Interna, tal como definida acima. A distribuição das estações remotas de Aquisição de Dados sobre a Rede é um problema a ser definido previamente, a nível de projeto. É possível assim que, por razões econômicas, a Rede Telemedida seja menor que a Rede Interna. Note-se também que, mesmo que por decisão de projeto a Rede Telemedida venha a cobrir toda a Rede Interna, a primeira pode vir a ser apenas uma parte da segunda, quando ocorrem perdas de importantes canais de telemedição.

Um outro conceito de interesse para este estudo é o de Barra de Fronteira do ponto de vista físico.

Barra de Fronteira (Física)

Barra de Fronteira é uma barra a qual pertence à Rede Interna e que tem pelo menos uma barra vizinha (conectada a ela) de uma outra Concessionária. Na figura 2.1, por exemplo, para a Concessionária P estas Barras de Fronteiras serão: $\{B_p, C_p, D_p, e E_p\}$.

2.2.2. Classificação das Redes Elétricas do ponto de vista da Cadeia Informática para a Operação em Tempo Real

Uma vez que a Concessionária P decida implementar as Funções para o Controle da Operação em Tempo Real, será necessário construir uma ferramenta que, baseada na identificação da Rede Telemedida, seja capaz de determinar a máxima componente observável da Rede. Por esta razão novas definições são necessárias, levando as seguintes denominações para as redes sob o ponto de vista da Cadeia Informática para Operação em Tempo Real:

- a) Rede Observável e
- b) Rede Não Observável.

Rede Observável

Uma Rede é dita observável se o conjunto de medidas analógicas contidas na Rede Telemedida, permite a determinação das magnitudes e ângulos das Tensões em cada uma das barras desta rede. Para a figura 2.1 o seguinte conjunto de barras compõem a Rede Observável: $\{A_p, B_p, C_p, D_p, E_p, F_A, H_B, J_C\}$.

Rede Não Observável

A Rede Não Observável corresponde ao conjunto das barras do Sistema de Potência Interligado para os quais não é possível se obter as tensões (em magnitude e ângulo de fase).

Surge então um novo conceito que é o de Barra de Fronteira sob o ponto de vista dos Programas que compõem a Cadeia Informática da Operação em Tempo Real.

Barra de Fronteira (Informática)

Barra de Fronteira Informática é uma barra que pertence à Rede Observável e que tem pelo menos uma barra elétrica vizinha (conectada a ela) Não Observável. No exemplo da figura 2.1 estas barras podem ser $\{F_A, H_B, J_C\}$ mas a determinação, nesse caso, depende dos resultados da Análise de Observabilidade do Sistema Elétrico de Potência [36], [37].

2.3. ESTADOS DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

Um Sistema de Potência pode atingir qualquer um dos estados típicos da operação os quais são: (a) Normal, (b) Alerta, (c) Emergência e (d) Restaurativo. A figura 2.2 mostra a evolução para cada um destes estados em função das ações de controle e das perturbações que podem vir a ocorrer.

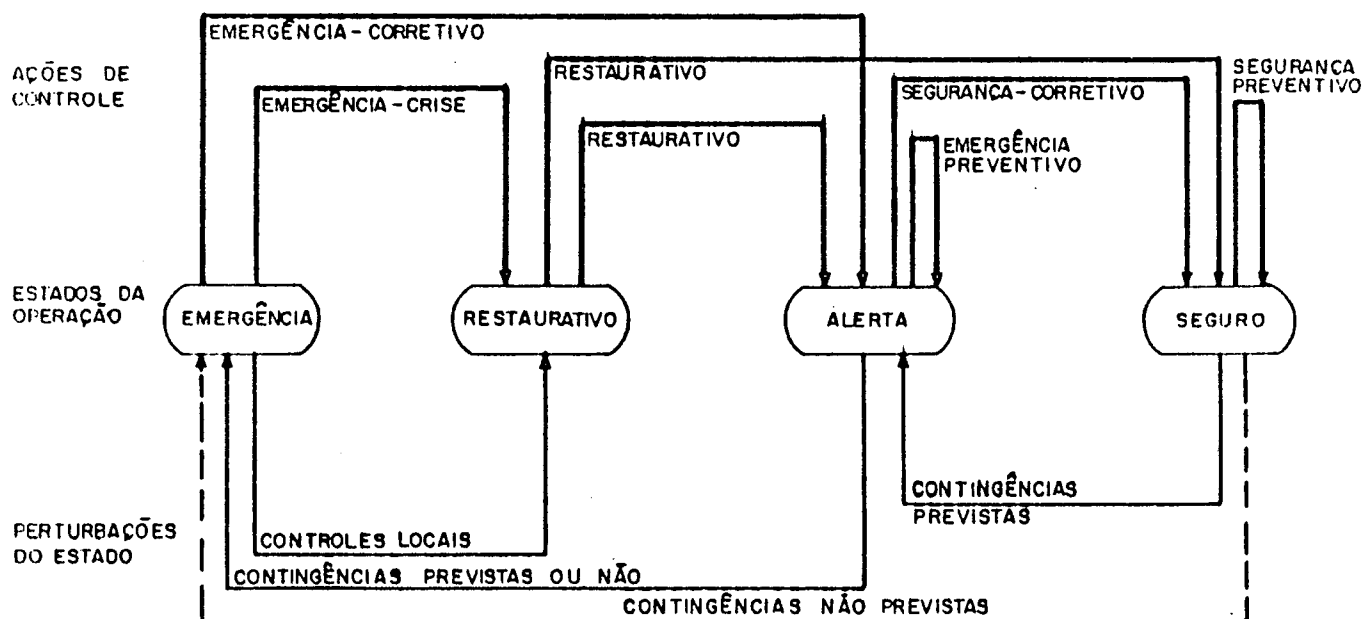


Figura 2.2. Estados da Operação de um Sistema Elétrico de Potência.

2.4. FUNÇÕES DE CONTROLE DA OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

As Funções de Controle da Operação dos Sistemas de Potência, são atualmente incorporadas nos modernos Centros de Controle com o objetivo de apoiar o operador e ajudá-lo a prevenir condições operativas que possam levar o Sistema a situações de vulnerabilidade, tais como: sobrecargas nos equipamentos, degradação dos perfis de tensão, queda de frequência etc. Além disso visam ajudar o operador a evitar instabilidade do Sistema, interrupção do fornecimento da energia e garantir a manutenção dos níveis de qualidade do fornecimento ao menor custo operacional possível.

As principais Funções do Controle da Operação de um Sistema de Potência podem ser divididas segundo o intervalo de tempo e o grau de recorrência fixado. Dois grandes grupos podem ser identificados, os quais são:

- a) Funções da Operação em Tempo Real e
- b) Funções Previsionais.

A representação das Funções da Operação em Tempo Real é feita com base na Cadeia Informática de Programas apresentada nas figuras 2.3(a) e 2.3 (b). Estas figuras mostram de modo simplificado, a relação entre as diversas funções que formam o conjunto de Funções de acompanhamento da Operação dos Sistemas Elétricos de Potência em Tempo Real.

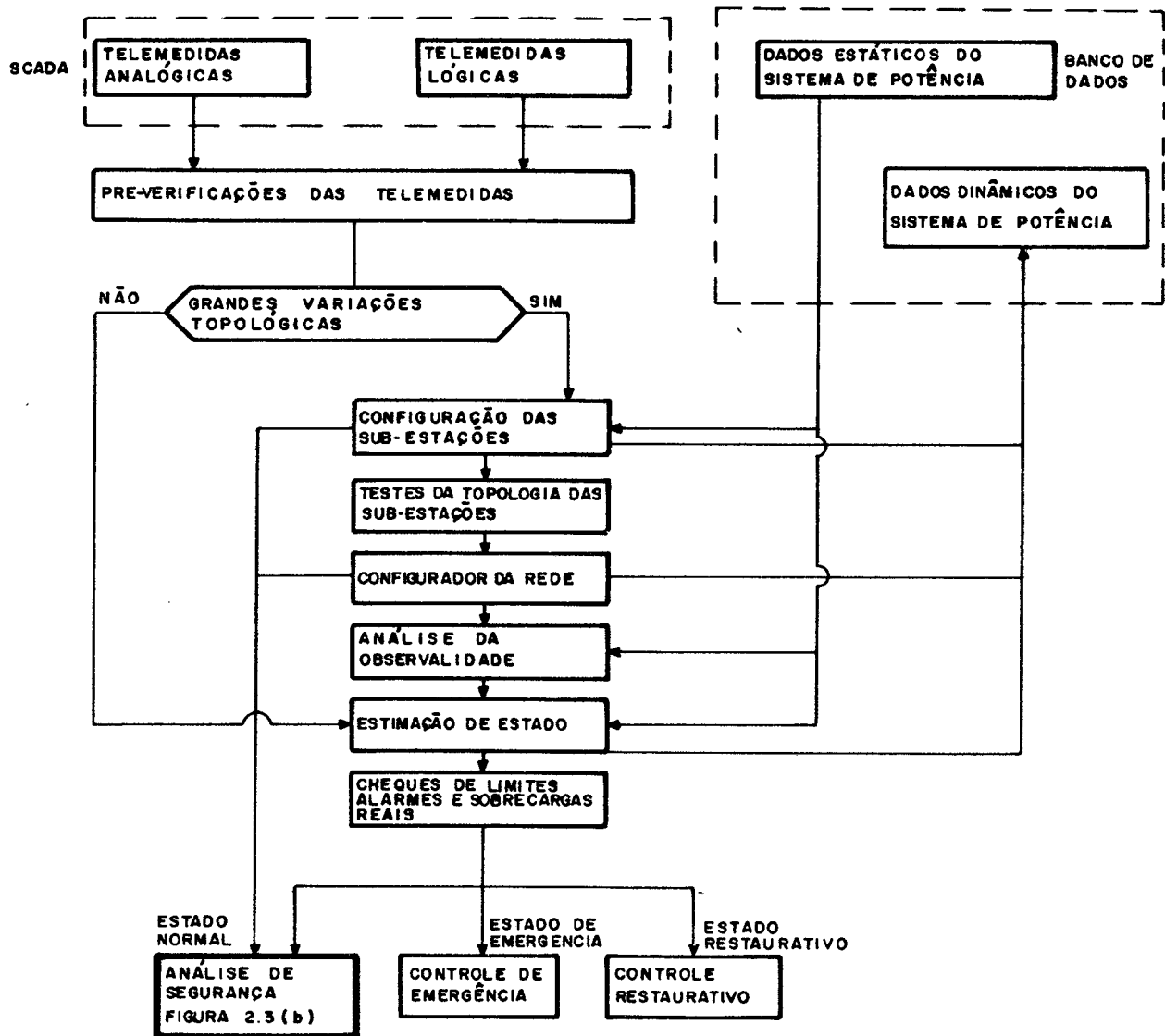
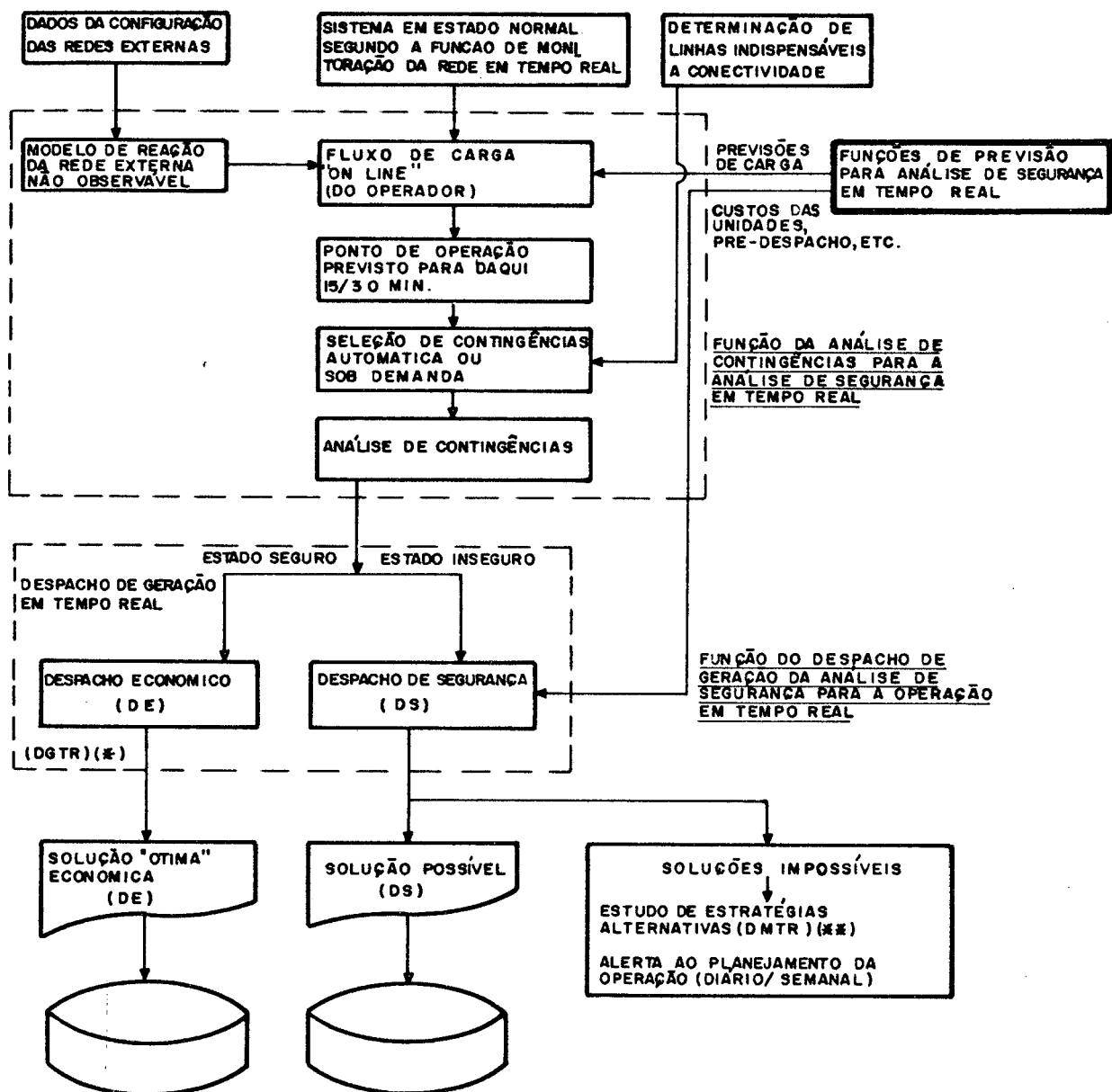


Figura 2.3(a) - Cadeia Informática da Função de Monitoração da Rede em Tempo Real.



(*) DGTR - Despacho de Geração em Tempo Real [34], [35].

(**) DMTR - Determinação de Alternativas de Controle via Mudanças de Topologia da Rede [38].

Figura 2.3(b) - Cadeia Informática das Funções Avançadas da Análise de Segurança.

Este conjunto de programas forma, em Tempo Real, subconjuntos bem definidos de funções que são: (a) Função de Monitoração da Rede em Tempo Real, (b) Função da Análise de Contingências para a Análise de Segurança em Tempo Real e (c) Função de Despacho de Geração da Análise de Segurança para a Operação em Tempo Real. Estas últimas duas Funções formam o subconjunto das Funções Avançadas da Análise de Segurança em Tempo Real e são brevemente descritas a seguir. Posteriormente, no item seguinte, estas Funções serão descritas com um pouco mais de detalhes. Aos leitores que desejarem aprofundar o conhecimento nesta direção sugere-se o exame dos seguintes trabalhos [29], [31] e a leitura do livro [30].

Função de Monitoração da Rede em Tempo Real

Esta função obtém e analisa o estado em que se encontra a parte observável do Sistema de Potência no instante t , baseada nas informações recebidas da Rede Telemedida.

Função da Análise de Contingências para a Análise de Segurança em Tempo Real

Esta Função procura examinar com antecedência suficiente os inconvenientes que poderão ser causados caso certas contingências, de um conjunto pré-selecionado [39], venham a ocorrer.

Função do Despacho de Geração da Análise de Segurança para a operação em Tempo Real

Esta Função procura fornecer estratégias alternativas para que as emergências potenciais, detetadas pela análise de Contingências, possam ser contornadas, de modo que o sistema não

abandone o Estado Normal (ou de alerta em último caso) [34], [35] e [38].

As Funções Previsionais procuram realizar uma análise das condições da Rede visando o futuro de 2 horas em diante até 24 horas. Estas Funções tem como objetivo estabelecer uma ligação entre o Planejamento da Operação a Nível Diário e a Operação em Tempo Real. As principais Funções Previsionais são: (a) Correções de Consumo e Produção, (b) Análise de Segurança Previsional, (c) Despacho Econômico Previsional, (d) Previsão de Custos, (e) Previsão de Energias, (f) Previsão de Disponibilidade, (g) Estudos de Reserva Girante, (h) Estudo de Margem de Regulação etc.

2.5. O CONFIGURADOR E AS FUNÇÕES DA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL

A seguir se procura mostrar a importância do Configurador de Rede em cada uma das Funções da Análise de Segurança já descritas.

2.5.1. Função de Monitoração da Rede em Tempo Real

A Função Monitoração da Rede em Tempo Real corresponde à cadeia de programas apresentada na figura 2.3(a). Esta Função é realizada em tempo real sobre a parte da rede declarada observável e deve entregar ao operador, via Estimação de Estado, o estado atual da rede, no que se refere a fluxos em linhas, tensões nas barras, etc, determinando assim se o Sistema se encontra em Estado Normal, Estado de Emergência ou Estado Restaurativo. Este estado deve ser entregue ao operador automaticamente cada vez que:

- muda o estado de um dispositivo lógico;

- muda a posição de um "tap" de um transformador;
- se perde ou recupera um canal de comunicação ou uma unidade terminal remota;
- o operador assim o desejar e
- no caso de não ter ocorrido nenhuma das situações anteriores, tenha transcorrido um tempo pré-determinado.

Para servir a esta função o configurador deve trabalhar com base nos estados dos Dispositivos Lógicos (telemedidas digitais) obtidos em tempo real. Estes dados estão acessíveis para aquelas subestações aparelhadas com equipamentos de telemedição. Nas demais subestações de interesse, que não dispõem de aquisição de sinais lógicos em Tempo Real, os estados dos Dispositivos Lógicos são obtidos como resultado de atualizações promovidos em modo conversacional pelos operadores do Sistema de Potência.

O Configurador de Rede deve ser projetado de modo a ser um programa capaz também de identificar todas as Subredes nas quais está dividida a rede de modo a orientar o teste de observabilidade, caso esta não forme uma única componente conexa.

Os modos de atuação do Configurador de Rede de Tempo Real são:

- a) Modo Inicialização e
- b) Modo Atualização.

Modo Inicialização

Neste Modo o Configurador deve obter a Configuração Topológica de todas as subestações da rede para armazenamento na Base de Dados.

Modo Atualização

No Modo de Atualização o Configurador é chamando somente caso ocorra um dos seguintes eventos: (a) Mude o estado de um Dispositivo lógico, o que leva a que se necessite reconfigurar aquelas subestações com mudança constatada na topologia e (b) quando o operador solicitar.

Dada a rapidez com que são requeridos estes resultados, o Configurador de Rede, que atua para esta Função, deve ser um Programa que efetue a atualização da Configuração da Rede em tempos compatíveis.

2.5.2. Função da Análise de Contingências para a Análise de Segurança em Tempo Real

A Cadeia de programas que compõem a Função Análise de Contingências é mostrada na figura 2.3 (b). Se na saída da Função Monitoração da Rede se verifica que o Sistema está em Estado Normal, a Função Análise de Contingências é acionada para testar o nível de segurança da Rede. A Função analisa, para condições futuras (15 a 30 min adiante) um conjunto de contingências pré-selecionadas fornecidas [39] pelo operador ou obtidas automaticamente. Procura determinar se o Sistema permanece, para uma determinada contingência, em Estado Seguro ou passa para a condição de Estado Inseguro. A utilização de métodos aproximados permite que esta Função possa analisar muitas contingências, para assim determinar quais dentre elas são mais críticas para o Sistema.

A Simulação das Contingências requer a modelagem completa da Rede (interna + externa), dado que uma variação na rede observável faz com que toda a rede externa reaja. Para levar em

conta a reação da rede não observável se desenvolvem Modelos de Reação para a atualização dos equivalentes externos. Aqui é necessário contar novamente com o Configurador de Rede para: (a) fornecer a topologia das redes não observáveis ao programa Atualizador dos Equivalentes Externos e (b) Fundir a rede observável com as redes Equivalentes Externas, para assim construir a rede global para os programas de Seleção e Análise das Contingências.

2.5.3. Função do Despacho de Geração da Análise de Segurança para a Operação em Tempo Real

A Função Despacho de Geração é apresentada na figura 2.3 (b). Esta Função deve fornecer as estratégias corretivas para eliminar as sobrecargas resultantes de certas contingências declaradas críticas pela Função de Análise de Contingências. A topologia da Rede já é conhecida, sendo a mesma fornecida anteriormente. Estas estratégias podem implicar no redespacho de geração e até no alívio de cargas interruptíveis [34], [35]. Pode-se também examinar, como recurso extremo ainda, a realização de manobras sobre a topologia da rede.

2.6. O CONFIGURADOR DE REDE E AS FUNÇÕES PREVISIONAIS

As Funções Previsionais, tais como Correções de Consumo e Produção e Análise de Segurança Previsional, precisam de uma configuração topológica da rede a ser analisada em modo estudo. Por isto se necessita de um Configurador de Rede que a produza. A função do Configurador de Rede nesse caso é a de produzir a Configuração de toda a Rede a ser analisada, baseando-se em dados de topologia previsionais.

Um outro modo de utilização para configurador de Redes em Sistemas de Potência, é aquele solicitado pelos Simuladores ou Laboratórios de Sistema de Potência, que são desenvolvidos para treinamento de Engenheiros e Operadores dos Centros de Controle de Energia.

2.7. CONCLUSÕES DESTE CAPÍTULO

Neste capítulo foram estudadas brevemente as funções da Operação em Tempo Real que vêm sendo implementadas nos modernos Centros de Controle, procurando mostrar como trabalha o Configurador da Rede para cada uma delas.

Para a discussão destas Funções julgou-se necessário apresentar as classificações das redes elétricas, sob o ponto de vista da decomposição física e desde o ponto de vista da Cadeia Informática para Operação em Tempo Real.

A principal contribuição deste Capítulo, é mostrar a importância do Configurador de Rede como pré-requisito para a implementação das Funções da Operação em Tempo Real.

CAPÍTULO III

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DA CONFIGURAÇÃO DA REDE

3.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

Dado que todos os caminhos de solução do problema da configuração da rede passam pela Teoria dos Grafos, torna-se indispensável definir e esclarecer alguns conceitos matemáticos relacionados com esta Teoria, com a finalidade de facilitar a abordagem do problema.

Os objetivos deste capítulo são, a partir de uma breve revisão histórica da Teoria dos Grafos:

- Mostrar os Tipos de representações mais usuais dos Grafos e, então,
- Aplicar esta Teoria matemática à formulação do problema da Configuração de Redes.

3.2. BREVE HISTÓRIA DA TEORIA DOS GRAFOS

O primeiro problema, cuja solução envolveu conceitos do que veio a se tornar a Teoria dos Grafos, foi resolvido por Euler em 1736 e não passava de uma especulação matemática. O chamado "problema das pontes de Königsberg", [3] , [12] , [14] , [15], era análogo aos atuais quebra-cabeças, baseados em um desenho cujas linhas devem ser percorridas sem que se tire o lápis do papel e sem passar duas vezes sobre a mesma linha.

Em 1847 Kirchhoff iniciou o estudo das Árvores - um tipo de Grafo - quando estudava problemas de circuitos elétricos [3], [12], [14], [15]. Cayley (1857) utilizou essa Teoria nos estudos de química orgânica [3], [12], [14], [15].. Em 1859 Hamilton estudava problemas de caminhos e Jordan já em 1869, procurava formalizar a Teoria das Árvores [3], [12], [14], [15].

No século XX a Teoria se desenvolveu rapidamente com o concurso de muitos pesquisadores, em particular de matemáticos [3], [14], [15]. A diversidade de escolas e de linguagens empregadas trouxe vários problemas de entendimento entre os autores, mas Berge no seu livro "Graphes et Hypergraphes" [14] procurou realizar, por meio de uma lista de equivalências entre os diferentes termos utilizados, a integração das diferentes tendências.

Não há ainda uma terminologia unificada sobre Grafos. A tendência atual, entre os pesquisadores que estudam o processamento de Grafos em computadores, é a de, além de desenvolver e aperfeiçoar algoritmos específicos, criar conjuntos de subprogramas, linguagens especializadas ou extensões a linguagens para a manipulação de Grafos. Alguns aspectos importantes que são considerados em tais iniciativas são:

- a) Definir uma notação simples, natural e poderosa que seja conveniente para descrever as operações que se deseja efetuar.
- b) Estabelecer um modo adequado de representar Grafos em computador.
- c) Decidir que algoritmos básicos implementar para que,

a partir desses, o pesquisador possa criar novos algoritmos para processos mais complexos.

3.3. REVISÃO MATEMÁTICA DA TEORIA DOS GRAFOS. DEFINIÇÕES.

Grafo

De acordo com a linguagem matemática, um Grafo é um conjunto de objetos $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ chamados vértices, nós ou pontos, e outro conjunto $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ tal que u_i é chamado arco ou aresta, relacionados entre si através de uma funcional $G = (X, U)$.

Arco ou Aresta

O arco ou aresta, de um Grafo é definido por $u_i = (x_i, x_j)$, onde x_i recebe o nome de Extremo Inicial e x_j o nome de Extremo Final.

Tem-se, portanto, elementos genéricos cujo significado depende do problema estudado. O Grafo nesse caso é representado como $G = (X, U)$, constituindo uma ferramenta que vem se mostrando cada vez mais poderosa [16], [3], para o tratamento de inúmeros problemas da vida real.

3.3.1. Tipos de Grafos

É possível classificar os Grafos como:

- Grafo Trivial,
- Hipergrafos,
- Grafos Orientados e Não Orientados,
- Grafos Rotulados e Não Rotulados,

- Grafos Valorados e Não Valorados,
- Grafo Simétrico,
- Grafo Antisimétrico,
- Grafo Completo,
- Grafo Complementar,
- Grafo Parcial,
- Subgrafos,
- Grafo Bipartido,
- Grafo Planar, etc.

Grafo Trivial

Denomina-se Grafo Trivial um Grafo que possui um único vértice e um único arco, o qual se fecha sobre si mesmo constituindo um Elo ou Anel. Matematicamente corresponde a uma equação do tipo:

$$x - b = 0$$

Exemplo:



Figura 3.1. Grafo Trivial.

Hipergrafo

Um par:

$$H = (X, \epsilon)$$

no qual

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \text{ (v\u00e9rtices) e;}$$

ϵ \u00e9 um subconjunto do conjunto de partes E_j de X n\u00e3o vazias, \u00e9 chamado Hipergrafo.

Exemplo:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$$

$$\epsilon = \{\{x_1, x_3, x_4\}, \{x_1, x_2, x_4\}, \{x_2, x_3\}\}$$

Se todos os E_j s\u00e3o todos diferentes ent\u00e3o ϵ \u00e9 um conjunto de partes de X e o Hipergrafo \u00e9 dito simples (como na figura 3.2); caso contr\u00e1rio, ele \u00e9 m\u00faltiplo.

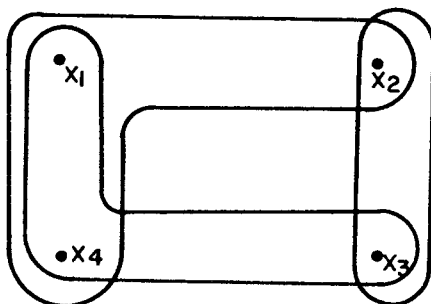


Figura 3.2. Hipergrafo simples.

Se todas as partes E_j de X que comp\u00f5em ϵ s\u00e3o a dois elementos, o Hipergrafo \u00e9 um Grafo simples ou Grafo N\u00e3o Orientado e \u00e9 representado como:

$$G = (X, U)$$

Grafo Orientado ou Dígrafo

Se $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ é um subconjunto do Conjunto $X \times X$ (produto cartesiano) o Grafo $G = (X, U, F, H)$ é chamado um Grafo Orientado. Cada arco é representado por uma seta cujo sentido corresponde à orientação do par ordenado, sendo esta orientação representada pelas funcionais $F(u)$ e $H(u)$ com $u \in U$, onde $F(u)$ é o conjunto das Extremidades Iniciais de u e $H(u)$ é o conjunto das Extremidades Finais de u .

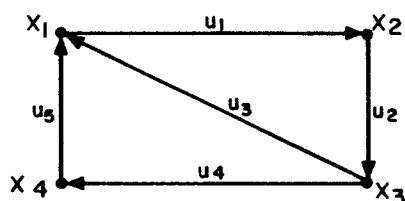


Figura 3.3. Grafo Orientado.

Para a figura 3.3. a representação do Grafo Orientado é:

$$U = \{(x_1, x_2), (x_2, x_3), (x_3, x_4), (x_3, x_1), (x_4, x_1)\}$$

$$F(u) = \{x_1, x_2, x_3, x_3, x_4\} \text{ e}$$

$$H(u) = \{x_2, x_3, x_4, x_1, x_1\}$$

Grafo Não Orientado

Se $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ é uma família de partes de X a dois elementos. O par $G = (X, U)$ nesse caso é chamado de Grafo Não Orientado.

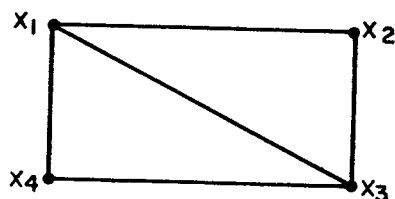


Figura 3.4. Grafo Não Orientado.

Para a Figura 3.4 a representação do Grafo Não Orientado é:

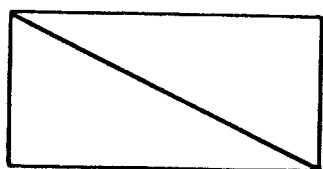
$$U = \{(x_1, x_2), (x_2, x_1), (x_1, x_3), (x_3, x_1), (x_1, x_4), (x_4, x_1), (x_2, x_3), \\ (x_3, x_2), (x_3, x_4), (x_4, x_3)\}$$

Dado que cada arco está representado duas vezes (por exemplo o arco que une os vértices x_1 e x_2 aparece como (x_1, x_2) e (x_2, x_1)) se pode apreciar, dentro desta representação, uma óbvia redundância.

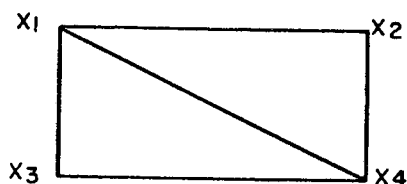
Um Grafo G qualquer, tem associado um e somente um Grafo Não Orientado.

Grafo Rotulado

Um Grafo Rotulado é aquele no qual foi realizada a identificação dos vértices, através de uma função determinada. Um exemplo de um Grafo Não Rotulado é dado na Figura 3.5(a). Já um exemplo de um Grafo Rotulado é dado na Figura 3.5(b).



(a)



(b)

Figura 3.5(a) Grafo Não Rotulado. (b) Grafo Rotulado.

Grafo Valorado

Um Grafo é valorado se existem uma ou mais funções relacionando X e/ou U com conjuntos quaisquer.

$$f : X \rightarrow P$$

$$x_i \rightarrow p_i \text{ ou seja, } p_i = f(x_i)$$

$$g : U \rightarrow Q$$

$$u_i \rightarrow q_i \text{ ou seja, } q_i = g(u_i)$$

ou:

$$(x_i, x_j) \rightarrow q_{ij} \text{ ou seja, } q_{ij} = g(x_i, x_j).$$

O significado dessas funções depende do problema. Na maioria das aplicações de Grafos a problemas de Engenharia, é necessário considerar-se grandezas tais como distâncias, altitudes, capacidades, fluxos, etc., associadas a localidades, estradas, etc., que definem os vértices e os arcos do Grafo. Em muitos problemas, no entanto, interessa apenas o inter-relacionamento dos vértices e não se definem funções, ou se pode considerar que elas são constantes. Diz-se então que o Grafo Não é Valorado. Os conjuntos P e

Q podem ser definidos especialmente, ou podem ser \mathbb{N} , \mathbb{R} , etc. Para Grafos Não Valorados pode-se dizer que $P = \{1\}$, e $Q = \{1\}$.

Grafo Simétrico

Um Grafo $G = (X, U)$ é Simétrico se:

$$\forall x_i, x_j \in X : (x_i, x_j) \in U \iff (x_j, x_i) \in U$$

Um Grafo Simétrico pode ser associado a um Grafo Não Orientado, substituindo-se cada par de arcos de sentidos opostos por uma aresta, assim como é mostrado na Figura 3.6.

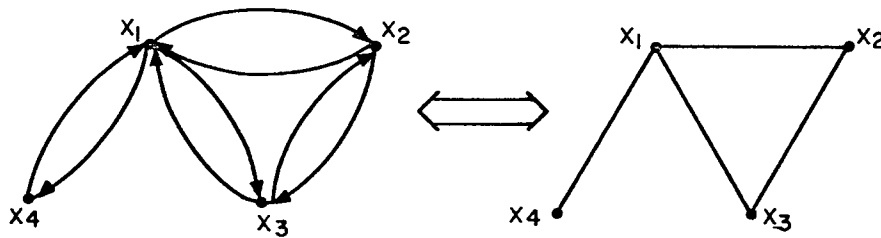


Figura 3.6. Grafo Simétrico.

Grafo Antisimétrico

Um Grafo $G = (X, U)$ é Antisimétrico se:

$$\forall x_i, x_j \in X : (x_i, x_j) \in U \implies (x_j, x_i) \notin U$$

Grafo Completo

Um Grafo $G = (X, U)$ é completo se:

$$\forall x_i, x_j \in X : (x_i, x_j) \notin U \implies (x_j, x_i) \in U$$

Ou seja, a ausência de um arco em um dado sentido entre dois vértices acarreta a presença do arco em sentido oposto entre os mesmos vértices. Logo, entre dois vértices quaisquer haverá pelo menos um arco.

Grafo Complementar

Um Grafo Complementar \bar{G} de um Grafo G é um Grafo que possui os mesmos vértices de G e os Arcos não existentes em G .

$$\bar{G} = (X, X \otimes X - U) \text{ para } G \text{ Orientado}$$

$$\bar{G} = (X, P_2(X) - U) \text{ para } G \text{ Não Orientado.}$$

Onde $X \otimes X$ indica o produto Cartesiano de X por X .

Grafo Parcial

Um Grafo Parcial G_i de um Grafo G é um Grafo que possui os mesmos vértices de G e um subconjunto de U .

Seja ∇ o conjunto de vértices adjacentes (termo definido adiante neste mesmo Capítulo) e seja ∇_1 um subconjunto de ∇ então:

$G = (X, \nabla_1)$ é um Grafo parcial de $G = (X, \nabla)$ quando:

$$\forall x_i \in X : \nabla_1(x_i) \subset \nabla(x_i)$$

Subgrafo

Um Subgrafo G' é de $G = (X, \nabla)$ é um Grafo tal que:

$$G' = (Y, \nabla_1)$$

onde

$$i) \quad Y \subset X$$

$$ii) \quad \forall x_i \in Y : \quad \Gamma_1(x_i) = Y \cap \Gamma(x_i)$$

Um Subgrafo é obtido, portanto, pela supressão de vértices de G (condição (i)), e dos arcos adjacentes a esses vértices (condição (ii)).

Grafo Bipartido

Um Grafo Bipartido é um Grafo $G = (X \cup Y, U)$ (figura 3.7), Se U for um conjunto de elementos $x \otimes x$ (caso orientado), ou de Conjuntos da forma $\{x_k, y_l\}$ (caso não orientado), não pode ter, portanto, arcos unindo elementos de X , ou de Y , entre si.

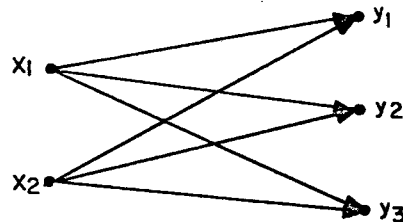


Figura 3.7. Grafo Bipartido.

Um Grafo Bipartido no qual $|X| = n_1$ e $|Y| = n_2$ tem, então, um máximo de n_1 vezes n_2 arcos.

Grafo Planar

Um Grafo é Planar quando existe alguma forma de se dispor

seus vértices em um plano, de tal modo que nenhum par de arestas se cruze.

O interesse prático pelos Grafos Planares está relacionado a problemas de ligações materiais como por exemplo: cruzamentos, regiões, circuitos impressos, etc.

Dentro da ótica deste trabalho, o interesse se concentrará sobre os conceitos de Grafo Rotulado, Não Valorado, Orientado e Não Orientado, sempre sem elos.

3.3.2. Tipos de Representação usuais de um Grafo

Os Tipos mais comuns de representação de Grafos são através de certas Matrizes e Listas. Pode-se distinguir três formas principais de realizar esta representação que são:

- Por meio de Listas;
- Por meio de Matrizes Booleanas e
- Por meio da Representação Sagital.

A seguir são examinadas cada um destes tipos de representação de modo mais detalhado.

1) Representação por meio de Listas

A representação por meio de Listas pode ser obtida por sua vez através das três formas abaixo:

a) Lista do Conjunto dos Arcos

Tendo numerados os n vértices do Grafo de uma forma arbitrária, uma Lista do Conjunto dos Arcos é uma representação onde se listam todos os marcos do Grafo como pares de vértices.

$$\text{Lista} = \{u_i \in U, \mid u_i = (x_k, x_l), \forall_i \mid i = 1, \dots, m\}$$

As representações já utilizadas neste capítulo, às figuras 3.3 e 3.4, são exemplos da forma de representar um Grafo como uma Lista do Conjunto dos Arcos.

b) Lista dos Arcos descrita pelas Extremidades Iniciais e Finais

Uma Lista dos Arcos, descrita pelas Extremidades Iniciais e Finais, é uma pequena variação da representação anterior. Trata-se de representar o Grafo por dois arranjos lineares onde cada elemento de cada arranjo corresponde a um vértice, assim:

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_m) \quad \text{Extremidades iniciais.}$$

$$H = (h_1, h_2, \dots, h_m) \quad \text{Extremidades finais.}$$

O i -ésimo arco u_i está entre a Extremidade Inicial f_i e a Extremidade Final h_i . A forma de representar o Grafo da figura 3.4 por meio da Lista dos Arcos descrita pelas Extremidades Iniciais e Finais é a seguinte:

$$F = (x_1, x_2, x_1, x_3, x_1, x_4, x_2, x_3, x_3, x_4)$$

$$H = (x_2, x_1, x_3, x_1, x_4, x_1, x_3, x_2, x_4, x_3)$$

c) Lista de Sucessores

Uma Lista de Sucessores é uma forma de representação onde, depois de assinalar os vértices numa ordem qualquer, representa-se cada vértice k por um arranjo linear, no qual o primeiro elemento é k e o resto dos elementos são os sucessores

res de k . No caso de um Grafo Não Orientado, são os elementos adjacentes de k . Para o Grafo do exemplo da figura 3.4 a representação seria a seguinte:

Vértice i	Sucessores de i
x_1 :	x_2, x_3, x_4
x_2 :	x_1, x_3
x_3 :	x_2, x_1, x_4
x_4 :	x_1, x_3

2) Representação por meio de Matrizes Booleanas

A representação por meio de Matrizes pode ser realizada através da definição dos três tipos de Matrizes associadas a um Grafo G , que são:

a) A Matriz de Adjacência ou Matriz de Conexão

A Matriz de Adjacências ou Matriz de Conexão é uma matriz de ordem $n \times n$, onde n é o número de vértices do Grafo. Esta Matriz é do tipo Booleana, sendo definida pelas relações

$$\underline{A} = |a_{ij}| \left\{ \begin{array}{l} a_{ij} = 1 \Leftrightarrow \exists (x_i, x_j) \\ a_{ij} = 0 \Leftrightarrow \nexists (x_i, x_j) \end{array} \right.$$

Para o Grafo da Figura 3.4 a Matriz de Adjacências será:

$\underline{A} =$

	x_1	x_2	x_3	x_4
x_1	0	1	1	1
x_2	1	0	1	0
x_3	1	1	0	1
x_4	1	0	1	0

Figura 3.8. Matriz de Adjacências ou Matriz de Conexão.

A Matriz de Adjacências é uma matriz comumente utilizada já que através de um tratamento matemático envolvendo-a, se podem obter informações que são de grande ajuda para a solução do problema que é tratado no presente trabalho.

Estes tratamentos matemáticos da Matriz de Adjacências, são baseados nos Teoremas 3.1 e 3.2 e servem como base para o Algoritmo das "Multiplicações Sucessivas da Matriz de Adjacências", que será apresentado no Capítulo IV. As demonstrações dos Teoremas não serão apresentadas aqui, mas o leitor interessado poderá encontrá-las nas referências [12] e [14] por exemplo.

Teorema 3.1. Se A é a Matriz de Adjacências do Grafo $G = (X, U)$ e $A^k = |a_{ij}^k|$ é a sua k -ésima potência Booleana, então $a_{ij}^{(k)} = 1$ se e somente se existe entre x_i e x_j um caminho de comprimento k .

Teorema 3.2. Se $A = |a_{ij}|$ é uma matriz Booleana na qual $a_{ij} = 1$, para todo i e j então:

$$A^{n-1} = A^n = A^{n+1} = A^{n+2} = \dots$$

b) A Matriz de Incidência

A Matriz de Incidência é uma matriz de ordem $n \times m$, onde n é o número de vértices e m o número de arcos. Nesta Matriz as colunas correspondem aos arcos do Grafo, e as linhas aos vértices. A Matriz de Incidência é do tipo Booleana, sendo definida para um Grafo Orientado. A Matriz de Incidência é definida pelas relações:

$$\underline{B} = |b_{ij}| \quad \begin{cases} b_{ij} = +1 \Leftrightarrow \text{o arco } u_j \text{ é incidente no vértice } x_i \\ b_{ij} = -1 \Leftrightarrow \text{o arco } u_j \text{ não é incidente no vértice } x_i \\ b_{ij} = 0 \quad \text{em todos os outros casos.} \end{cases}$$

Esta Matriz especifica, portanto, se o vértice x_i é Extremidade Inicial ou Final, do arco u_j . Para a figura 3.3 a Matriz de Incidência será:

$\underline{B} =$

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
x_1	1	0	-1	0	-1
x_2	-1	1	0	0	0
x_3	0	-1	1	1	0
x_4	0	0	0	-1	1

Figura 3.9. Matriz de Incidência.

A Matriz de Incidência para um Grafo Não Orientado, terá como elementos não nulos apenas:

$$b_{ij} = b_{ji} = 1 \quad \Leftrightarrow \exists (x_i, x_j) \\ \{ (\forall i, j), \mid i, j \in X \}$$

c) A Matriz Latina

A Matriz Latina é uma Matriz figurativa, cujos elementos são conjuntos de vértices. Esta Matriz é usada em problemas de enumeração de caminhos. Se $|\underline{M}|^{(1)}$ é a Matriz Latina dos caminhos de comprimento 1 e $|\underline{M}'|^{(1)}$ é a mesma Matriz, mas onde as seqüências não contêm as Extremidades Iniciais, a multiplicação de $|\underline{M}|^{(1)} * |\underline{M}'|^{(1)}$ fornece $|\underline{M}|^{(2)}$, que é precisamente a Matriz Latina dos caminhos de comprimento 2. Assim, sucessivamente se obterá:

$$|\underline{M}|^{(2)} * |\underline{M}'|^{(1)} = |\underline{M}|^{(3)}$$

$$" \quad " \quad "$$

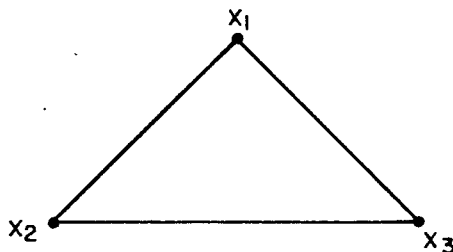
$$" \quad " \quad "$$

$$" \quad " \quad "$$

$$|\underline{M}|^{(n-1)} * |\underline{M}'|^{(1)} = |\underline{M}|^{(n)}$$

Este procedimento permite a enumeração dos caminhos de comprimento 1, 2, 3, ..., n, sem omissões nem repetições.

Seja o seguinte Grafo:



A Matriz Latina \underline{M} dos caminhos de longitude 1 é apresentada na figura 3.10 (a). A Matriz Latina sem as Extremidades Iniciais é apresentada na figura 3.10 (b).

	x_1	x_2	x_3
x_1		$x_1 x_2$	$x_1 x_3$
x_2			$x_2 x_3$
x_3			

(a)

	x_1	x_2	x_3
x_1		x_2	x_3
x_2			x_3
x_3			

(b)

Figura 3.10. Matriz Latina.

O trabalho computacional com Matrizes Latinas exige o uso de cadeias de caracteres.

3) Representação Sagital

A Representação Sagital é a representação do Grafo de modo figurativo, sendo utilizada somente para fins de apreciação visual. Exemplos deste tipo de representação são todas as figuras de Grafos apresentados neste Capítulo.

3.3.3. Conexidade de um Grafo

Para se chegar à definição de Conexidade de um Grafo é necessário antes esclarecer alguns conceitos a ela relacionados, como segue.

Vértice Adjacente

Chama-se Vértice Adjacente, ou Vizinho, de x_i , a todo x_j ligado a x_i por um arco pelo menos.

x_i vizinho a $x_j \Leftrightarrow \exists (x_i, x_j)$

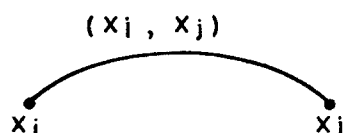


Figura 3.11. Vértice Adjacente.

O conjunto de vértices adjacentes ou vizinhos a x_i é expresso como $\nabla(x_i)$:

$$\nabla(x_i) = \{x_j \mid \exists (x_i, x_j)\}$$

Cadeia

Uma Cadeia é uma seqüência de arcos de um grafo, tal que cada arco tem:

- uma extremidade comum com o arco antecedente (a exceção do primeiro) e
- a outra extremidade em comum com o arco subsequente (a exceção do último).

Como não se especifica de quais terminais se trata, o conceito de Cadeia é Não Orientado. Uma cadeia pode ser representada pela seqüência dos arcos que a constituem ou dos vértices que são por ela visitados.

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_m) \text{ ou } U = |x_1, x_2, \dots, x_n|$$

Caminho

Um Caminho é uma cadeia na qual todos os arcos possuem a mesma orientação. O conceito de caminho é, portanto, orientado e não tem sentido em Grafos Não Orientados.

Conexidade de um Grafo

A noção de Conexidade corresponde ao "estado de ligação" dos vértices de um grafo; ou seja, à possibilidade de se transitar num Grafo de um vértice a um outro qualquer.

Grafo Conexo

Grafo Conexo é um Grafo tal que para todos x_i, x_j , pertencentes a X , existe uma cadeia de x_i a x_j .

Grafo Fortemente Conexo

Grafo Fortemente Conexo é um Grafo no qual todo par de vértices participa de um Caminho fechado. Pode-se dizer, também, que é um Grafo no qual todo par de vértices está unido por pelo menos um caminho em cada sentido; ou ainda que, dados dois vértices quaisquer, cada um pode ser atingido a partir do outro.

Grafo Não Conexo

Grafo Não Conexo é um Grafo no qual existe pelo menos um par de vértices x_i, x_j , que não é extremidade de nenhuma Cadeia. Um Grafo Não Conexos é formado por pelo menos duas subgrafos conexos.

3.3.4. Árvores

Um dos conceitos mais importantes na Teoria de Grafos é o conceito de árvore.

Árvore

Uma Árvore é um Grafo Conexo, sem ciclos, que pode ter $1, 2, \dots, n$ vértices, conforme é mostrado na figura 3.12. Uma árvore deve ter pelo menos um vértice. No caso da Árvore ter um vértice só, ela é chamada de Árvore Trivial.

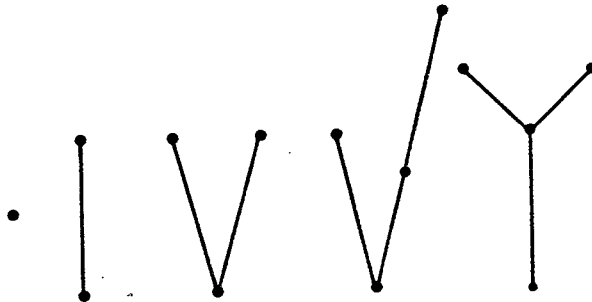


Figura 3.12. Árvores com 1, 2, 3 e 4 vértices.

Teorema 3.3. Seja $G = (X, U)$ um Grafo com $n > 2$. As propriedades seguintes são equivalentes para caracterizar G como uma Árvore.

- G é Conexo e sem ciclos;
- G é sem ciclos e tem $n-1$ arestas;
- G é Conexo e tem $n-1$ arestas;
- G é sem ciclos e pela adição de uma aresta se cria um ciclo;
- G é Conexo mas deixa de sê-lo se uma aresta é suprimida e
- todo par de vértices de G é unido por uma e uma só cadeia simples.

A demonstração deste Teorema é clássica e pode ser encontrada, pelo leitor interessado na Referência [12] por exemplo.

Teorema 3.4. Um Grafo com os vértices rotulados, onde $n > 2$, tem n^{n-2} Árvores rotuladas possíveis.

Isto quer dizer que, para um Grafo de quatro (4) vértices rotulados, se pode obter 16 Árvores que são as seguintes.

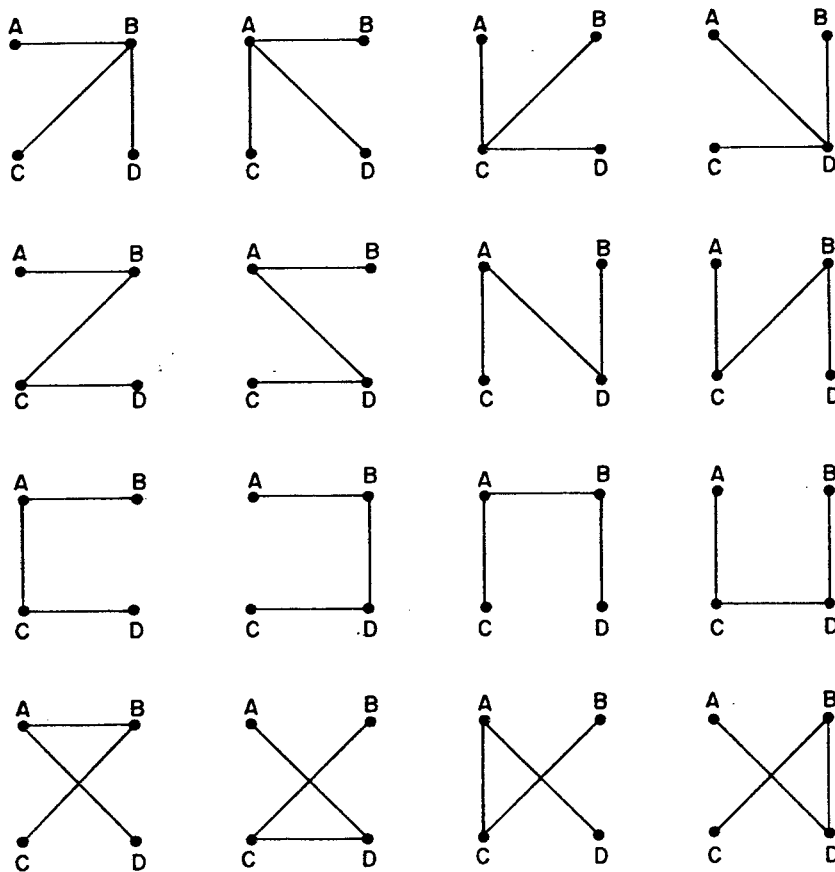


Figura 3.13. Todas as 16 Árvores para um Grafo de 4 vértices rotulados.

A Demonstração deste Teorema também é clássica e não será apresentada aqui. O leitor interessado poderá encontrá-la nas Referências [3] e [25] por exemplo.

Árvore Geradora

Uma Árvore T é dita uma Árvore Geradora do grafo G , se T é um subgrafo de G e contém todos os vértices de G .

Por exemplo, o Subgrafo em negrito da figura 3.14 é uma Árvore Geradora do Grafo apresentado.

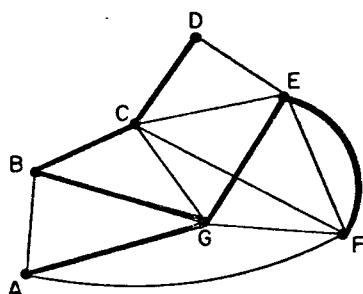


Figura 3.14. Árvore Geradora do Grafo.

Teorema 3.5. Um Grafo $G = (X, U)$ admite uma Árvore Geradora que seja uma Árvore se, e somente se, G é conexo.

É importante apresentar a demonstração deste Teorema aqui, já que ela fornece a base para o Algoritmo (Capítulo IV), destinado à determinação de uma Árvore Geradora de um Grafo.

Demonstração: Se G não é conexo, nenhum de seus Grafos parciais o é, logo, nenhum deles pode ser uma Árvore.

Se G é Conexo procura-se um arco cuja supressão não desconecte G . Tem-se dois casos possíveis:

- 1º) Este arco não existe; ou seja, o arco candidato a ser suprimido desconecta G , logo faz parte da Árvore do Grafo G .

2º) Este arco existe e então é suprimido: repete-se o processo até recair no caso anterior.

Passa-se então a examinar outro arco, repetindo o processo, até que todos os arcos tenham sido examinados. Neste ponto, concluído o tratamento, se terá obtido um Grafo Conexo cujos arcos são todos essenciais e a eliminação de qualquer um deles torna G não Conexo. Cqd.

Outra maneira de demonstrar este Teorema seria usar a propriedade (e) do Teorema 3.3 (ver Berge [14]).

Circuito Fundamental

Dada a Árvore T do Grafo G , em geral todos os circuitos formados pela adição em T de qualquer arco de G que não pertence a T , são chamados Circuitos Fundamentais, desde que todos eles formem a base do espaço vetorial dos circuitos.

3.4. O PROBLEMA DO CONFIGURADOR DE REDE. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.

A rede malhada do Sistema de Potência pode ser representada através de um Grafo associado tal como:

$$G = (X, U)$$

Onde:

X: Conjunto de barras (ver Apêndice A) do Sistema de Potência. Estes serão os vértices do Grafo da Rede.

U: Conjunto de Equipamentos Série do Sistema de Potência (ver Apêndice A). Estes serão os arcos do Grafo da Rede.

No caso de um Grafo associado a uma rede elétrica a Conexidade pressupõe a existência de uma Cadeia de ligações elétricas.

Para que o Grafo G global da rede possa ser determinado é preciso inicialmente determinar os Subgrafos associados a cada subestação que compõem a rede elétrica.

Definição do Problema

O problema da determinação da configuração da Rede Elétrica consiste em obter a representação matemática deste Grafo, o que significa identificar biunivocamente as Barras (X) e os equipamentos série (U) do Grafo global G do Sistema de Potência.

A determinação da topologia global é assim um processo que consiste em percorrer as seguintes etapas:

1) Identificação dos Subgrafos de cada subestação. Estes subgrafos conterão os vértices do Grafo global da rede. Os arcos que compõem estes subgrafos são os dispositivos lógicos fechados. Dada a dinâmica da variação de estado dos dispositivos lógicos, uma subestação pode ser dividida em vários subgrafos, tal como se pode ver no exemplo da figura 1.1. (pág. 3).

2) Obtenção dos equipamentos eletricamente conectados a cada Subgrafo de subestação obtido na etapa 1. Dentro do conjunto destes equipamentos o subconjunto de Equipamentos Série contém os arcos do Grafo global da Rede.

3) Identificação da Cadeia de Subgrafos de subestação conectados eletricamente entre si, através de equipamentos série.

Os conjuntos de Subgrafos de subestação Conexos formarão o conjunto dos vértices do Grafo, ou Grafos, em que está dividida a rede total do Sistema de Potência.

Desta forma fica determinado o Grafo $G = (X, U)$ da rede total.

A Orientação ou não do Grafo depende da natureza do estudo que será realizado a partir da obtenção do Grafo da Rede. Uma forma simples de orientar o Grafo associado à Rede Elétrica é apresentada por Stagg e El-Abiad no livro "Computer Methods in Power System Analysis" [26].

Como se pode ver, o problema de configuração da rede pode ser dividido em dois sub-problemas. O primeiro é aquele relacionado com os passos 1 e 2 do processo acima e corresponde à etapa de Configuração de Subestações. O segundo corresponde ao passo 3 e é aquele que trata da Configuração da Rede.

3.5. CONCLUSÕES DESTE CAPÍTULO

O que se pretendeu neste Capítulo foi chegar a formulação matemática do problema da configuração da rede através de uma revisão matemática da Teoria dos Grafos.

Para poder definir matematicamente o problema da configuração de rede achou-se oportuno definir os diferentes Tipos de Grafos, os tipos de representação usuais de um Grafo e os conceitos de Conexidade e de Árvore.

Um outro objetivo que foi perseguido neste Capítulo, através da Formulação Matemática do problema, foi o de fornecer ao leitor uma base matemática de modo a tornar confortável a leitura dos Capítulos seguintes.

CAPÍTULO IV

ALGORITMOS MATEMÁTICOS APLICÁVEIS À SOLUÇÃO DO PROBLEMA DO CONFIGURADOR DE REDE

4.1. OBJETIVOS DO CAPÍTULO

Os sistemas de potência de hoje apresentam uma grande quantidade de equipamentos os quais são interconectados eletricamente formando uma rede de grande dimensão, para a qual torna-se virtualmente impossível pretender obter o Grafo associado sem a ajuda do computador. O objetivo deste capítulo é apresentar os principais algoritmos que são oferecidos pela Matemática, bem com outros que têm sido apresentados na literatura dos Sistemas de Potência, para resolver o problema da obtenção deste Grafo. Estes Algoritmos devem atender a requisitos de velocidade de processamento e de eficiência, para que possam ser aplicados à obtenção do Grafo da Rede de um Sistema de Potência real, notadamente quando se precisa deste atualizado em Tempo Real, ou quando se necessita examinar grande número de variantes topológicos, como no planejamento da operação por exemplo.

Os Algoritmos aqui descritos são apresentados ordenados de acordo com os tipos de representação de um Grafo, tal como revistas no Capítulo anterior, e utilizam como técnica de trabalho uma das três alternativas seguintes: (a) Visita aos vértices, (b) Passeio pelos arcos do Grafo e (c) Tratamentos matemáticos envolvendo a Matriz de Adjacências.

Finalmente, neste Capítulo se faz uma análise dos Algoritmos apresentados, procurando justificar as escolhas feitas e apontando aqueles eleitos para implementação sob a forma de programas Configuradores de Rede.

4.2. ALGORITMOS QUE SE UTILIZAM DA REPRESENTAÇÃO DO GRAFO POR MEIO DE LISTAS

Dentre os Algoritmos que utilizam a representação do Grafo por meio de Listas destacam-se os de Paton, Dijkstra, Obtenção da Árvore Geradora e o Configurador de Rede que utiliza a Técnica de Passeio pelos Arcos [4] , os quais passam a ser examinados a seguir.

4.2.1. Algoritmo de Paton ou Algoritmo dos Circuitos Fundamentais

O Algoritmo de Paton é utilizado para encontrar os Circuitos Fundamentais de um Grafo G. Este algoritmo pertence à classe dos algoritmos que trabalha por visita aos vértices, podendo ser descrito como segue:

Seja o Grafo Rotulado $G = (X, U)$, Os Vértices X são Rotulados assim:

$$X = 1, 2, \dots, n$$

Seja T o conjunto de vértices que já foram visitados e W o conjunto de vértices ainda não visitados.

Inicialmente se faz $T = \{\emptyset\}$, vazio, e $W = X$; ou seja, admite-se que o conjunto total de vértices do Grafo G ainda não foi visitado.

O passo seguinte é fazer T igual ao primeiro vértice de X . Depois destas inicializações o procedimento é o seguinte:

- 1º) Se $T \cap W = \{\emptyset\}$, então o Algoritmo é terminado.
- 2º) Se $T \cap W \neq \{\emptyset\}$, escolhe-se um vértice z em $T \cap W$.
- 3º) Examinar z percorrendo cada um dos arcos nele incidentes. Quando todos os arcos incidentes ao vértice z tiverem sido analisados, então elimine z do conjunto w e volte ao 1º passo.
- 4º) Caso exista o arco (p, z) , verificar se p está no conjunto T .
- 5º) Se $p \in T$, determinar o Circuito Fundamental a que pertence o arco (p, z) . Retirar (p, z) do conjunto de arcos para que não seja mais considerado. Voltar ao 3º passo.
- 6º) Se $p \notin T$, adicionar o arco (p, z) à árvore. Incluir o vértice p no conjunto T . Retirar (p, z) do Conjunto de arcos para que não seja mais considerado. Voltar ao 3º passo.

O Algoritmo de Paton visita cada vértice do Grafo, percorrendo cada um dos arcos incidentes ao vértice visitado, para desta forma obter os Circuitos Fundamentais. Este Algoritmo trabalha por inclusão de vértices adjacentes ao vértice visitado na árvore. Cada vez que um deles é incluído deve ser armazenado de forma a garantir que sejam os próximos a ser visitados. O que claramente mostra que o Algoritmo de Paton procura um Caminho a partir de um vértice raiz previamente escolhido. A extensão deste Algoritmo para obter o Grafo Completo G se faz da seguinte forma: Sempre que se encontra um Circuito Fundamental este deve ser adi-

cionado como parte do Grafo (passo 5º do Algoritmo).

Um exemplo de aplicação deste Algoritmo pode ser encontrado na Referência [11] deste trabalho.

4.2.2. Algoritmo Dijkstra

Este Algoritmo trata de resolver o problema de encontrar o caminho de menor valor entre dois v̄rtices especificados x_i e x_j de um Grafo Valorado. O Algoritmo Dijkstra, como o Algoritmo de Paton, pertence à classe dos algoritmos que utilizam a técnica de visita aos v̄rtices do Grafo G. Para uma melhor compreensão da técnica utilizada por este Algoritmo é apresentado o seguinte exemplo.

Exemplo:

Seja G o Grafo Rotulado e Valorado da Figura 4.1.

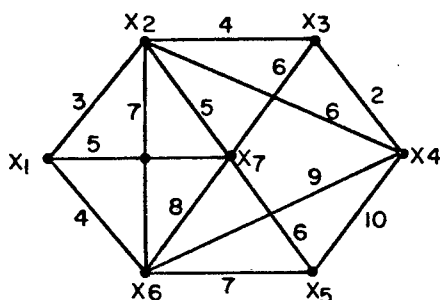


Figura 4.1. Grafo Valorado exemplo do Algoritmo Dijkstra.

Inicialização: Tomar o arco $|x_3, x_4|$, por ser o arco do Grafo G com menor valor.

Vértices adjacentes	x_2	x_5	x_6	x_7
Valor do arco	④	10	9	6

Vértice a incluir; x_2 via $|x_2, x_3|$ (de valor 4)

Vértices adjacentes	x_1	x_5	x_6	x_7
Valor do arco	③	10	7	5

Vértices a incluir: x_1 via $|x_1, x_2|$ (de valor 3)

Vértices adjacentes	x_5	x_6	x_7
Valor do arco	10	④	5

Vértice a incluir: x_6 via $|x_1, x_6|$ (de valor 4)

etc.

A diferença com relação ao Algoritmo de Paton, está em que cada vértice incluído só pode levar um arco à árvore por vez. Este arco, no caso de Grafos Valorados, é aquele de menor valor. Para os Grafos de Redes de Sistemas de Potência, utilizando neste problema (Grafos Não-Valorados), o vértice incluído será qualquer um, já que todos os arcos tem valores iguais a 1.

4.2.3. Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora

Este Algoritmo obtém a Árvore Geradora de um Grafo G. A técnica utilizada consiste em realizar um passeio pelos arcos do Grafo. Este Algoritmo está baseado no Teorema 3.5 apresentado no Capítulo III. O Algoritmo pode ser descrito como segue:

Seja o Grafo Rotulado $G = (X, U)$, onde os vértices X do Grafo G são Rotulados assim:

$$X = 1, 2, \dots, n$$

e a lista dos arcos:

$F = (f_1, f_2, \dots, f_m)$, f_i   a Extremidade Inicial Rotulada do arco i ,

$H = (h_1, h_2, \dots, h_m)$, h_i   a Extremidade Final Rotulada do arco i ,

e seja C o número de Subgrafos do Grafo G , inicializado em 0.

O procedimento é o seguinte:

1 ) Para cada um dos arcos do Grafo:

- a) Se os vértices f_i e h_i , do arco i em consideração, não estão incluídos em nenhum dos Subgrafos já construídos do Grafo G , se começa um novo Subgrafo com os vértices f_i e h_i e se incrementa o valor de C em 1.
- b) Se o vértice f_i está em um Subgrafo G'_k do Grafo G e h_i em um outro Subgrafo G'_j do Grafo G e $k \neq j$, então o arco i é utilizado para conectar esses dois Subgrafos. O valor de C é decrementado em 1.
- c) Se ambos os vértices f_i e h_i estão em um mesmo Subgrafo, o arco i é um Circuito Fundamental e deixa de ser considerado.
- d) Se o vértice f_i do arco i em consideração está num Subgrafo G'_j e o vértice h_i não está em nenhum Sub

grafo, o arco i é adicionado a G'_j .

- e) Se o vértice f_i do arco i em consideração não pertence a nenhum Subgrafo, então h_i pertence a um Subgrafo G'_k , com o que o arco i é adicionado a G'_k .

O Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora, como se pode ver por esta descrição do algoritmo, precisa de um único passeio pelos arcos do Grafo para obter a sua Árvore Geradora. O que conduz a induzir, que uma generalização deste Algoritmo, para obter o Grafo G de uma rede associada a um Sistema de Potência necessita realizar um único passeio por todos os arcos do Grafo. A extensão deste Algoritmo para obter o Grafo Completo G , se faz da seguinte forma: No item (c) do algoritmo se encontra um Circuito Fundamental, que para o caso da Árvore Geradora não deve ser considerado. Para o caso de obter o Grafo completo da Rede este Circuito Fundamental deve ser adicionado como componente do Grafo G .

4.2.4. Algoritmo para Configurar Redes baseado na Técnica de Passeio pelos Arcos

Este Configurador de Rede foi apresentado em 1976 na literatura dos Sistemas de Potência por Sullivan e outros [4], e teve uma ampla utilização [28], [07]. A Técnica utilizada por este algoritmo é a mesma do algoritmo anterior, mas a intenção, ao apresentar este algoritmo aqui, é mostrar como algoritmos baseados na mesma técnica por simples detalhes de implementação podem

se tornar completamente diferentes em termos de desempenho e quanto a seu tempo de resposta. O algoritmo pode ser descrito como segue:

Seja o Grafo Rotulado $G = (X, U)$, onde os vértices X do Grafo G são Rotulados assim:

$$X = 1, 2, \dots, n$$

Seja $C(x)$ o conjunto de vértices do grafo;

$F = (f_1, f_2, \dots, f_m)$, f_i   a Extremidade Inicial Rotulada do arco i ,

$H = (h_1, h_2, \dots, h_m)$, h_i   a Extremidade Final Rotulada do arco i .

O procedimento é o seguinte:

1 ) Para cada um dos arcos do Grafo:

a) Fazer $J = f_i$, Extremidade Inicial do arco i em consideração;

b) Fazer $K = h_i$, Extremidade Final do arco i em consideração;

c) Fazer

$$P = \text{mínimo valor de } (J, K, C(J), C(K))$$

d) Fazer

$$C(J) = P$$

$$C(K) = P$$

Detetar se houve troca de valor em $C(J)$ ou $C(K)$.

- 2º) Se no passeio anterior pelos arcos do Grafo houver alguma troca de valor no Conjunto C, voltar ao 1º passo.
- 3º) Se no passeio anterior pelos arcos do Grafo não houver troca nenhuma de valor no Conjunto C, passar ao 4º passo.
- 4º) Todos os vértices de C que têm associado o mesmo valor pertencem ao mesmo Subgrafo e termina o procedimento.

A diferença principal deste algoritmo, com relação ao Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora, está em que este algoritmo precisa realizar mais de um passeio por todos os arcos do Grafo, já que, da forma como está sugerida sua implementação, no n -ésimo passeio completo por todos os arcos ele permite obter somente os caminhos de comprimento n de cada vértice.

O que faz com que isto ocorra é o seguinte:

No passo (d) deste algoritmo, sempre que houver uma troca de valor de um determinado vértice x_i , isto implicará, de modo direto, na associação deste vértice x_i com um outro Subgrafo; ou seja, dois Subgrafos devem ser fundidos num único.

No procedimento implementado por Sullivan e outros, este passo é realizado renumerando os vértices das componentes fundidas de tal modo que se torna necessário mais de um passeio por todos os arcos do Grafo. Isto porque, em cada passeio completo, se acaba juntando um único vértice por vez.

Se em vez disso, neste passo (d) se renumerassem todos os vértices da componente conexa recém fundida, bastaria um

único passeio completo pelos arcos do Grafo para estender a componente conexa.

Uma vez feita esta modificação, estes algoritmos tornam-se similares, embora o Algoritmo para a Obtenção da Árvore Geradora seja mais sofisticado.

4.3. ALGORITMOS PARA A REPRESENTAÇÃO POR MEIO DA MATRIZ DE ADJACÊNCIAS

Dentre os Algoritmos que utilizam o Grafo representado desta forma pode-se destacar o Algoritmo das Multiplicações Sucessivas da Matriz de Adjacências e o Algoritmo da contração dos Vértices Adjacentes, os quais passam a ser examinados. Estes algoritmos utilizam a Matriz de Adjacências com todos os elementos diagonais iguais a 1.

4.3.1. Algoritmo das Multiplicações Sucessivas da Matriz de Adjacências

Este algoritmo foi apresentado na literatura da Configuração de Redes dos Sistemas de Potência no ano de 1980 por Goderya e outros [6]. A técnica utilizada se baseia nos Teoremas 3.1 e 3.2 apresentados no Capítulo III. O Algoritmo pode ser descrito como segue:

Seja \underline{A} a Matriz de Adjacências do Grafo G do ordem $n \times n$.

1º) Encontrar a Matriz \underline{T} segundo a seguinte expressão:

$$\underline{T} = \underline{A} \times \underline{A}$$

2º) Usando a Matriz \underline{T} obter a matriz \underline{A} da seguinte forma:

$$\underline{A} = \underline{T} \times \underline{T}$$

Continuar alternativamente usando os passos 1 e 2 até atingir uma das seguintes condições:

- a) T ou A possuam uns (1's) em todas as posições;
- b) A matriz A obtida no 2º) passo, seja igual à matriz T obtida no 1º) passo;
- c) A Matriz T obtida no 1º) passo, seja igual à matriz A obtida no 2º) passo;
- d) A Matriz A atinja a potência Booleana máxima \underline{A}^n ; ou seja, todos os caminhos de comprimento n sejam atingidos.

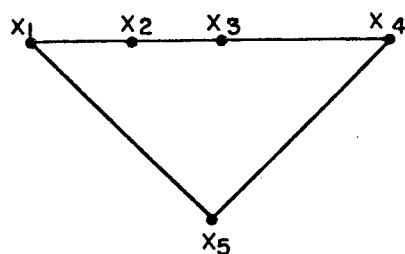
O Algoritmo das Multiplicações sucessivas da Matriz de Adjacências, apresenta as seguintes desvantagens: (a) Exige uma grande área de armazenamento no computador, já que precisa pelo menos de uma área de $2n^2$, para armazenar duas vezes a Matriz de Adjacências de um Grafo de n vértices. Embora as Matrizes de Adjacências dos Grafos dos Sistemas de Potência sejam matrizes esparsas, o resultado ao final do processamento através deste algoritmo, quando o Grafo é Completo, é uma matriz cheia. (b) Requer muitas multiplicações matriciais, o que implica em muitos cálculos, conduzindo a um Configurador de Rede lento, o que é uma grande limitação frente ao problema que se pretende resolver.

4.3.2. Algoritmo de Contração de Vértices Adjacentes

Este Algoritmo obtém o Grafo total de um Grafo G , utilizando a técnica da Adição Lógica para conectar o j -ésimo vértice do Grafo com o i -ésimo vértice. A Adição Lógica, para conectar

estes vértices consiste em somar a i -ésima fila da Matriz de Adjacências com a j -ésima fila da mesma Matriz. Para explicar como é realizado isto considere-se o seguinte exemplo:

Seja o Grafo:



A sua Matriz de Adjacências é a seguinte:

$\underline{A} =$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
x_1	0	1	0	0	1
x_2	1	0	1	0	0
x_3	0	1	0	1	0
x_4	0	0	1	0	1
x_5	1	0	0	1	0

A Adição Lógica da linha 1 (vértice x_1) e a linha 2 (vértice x_2) resulta numa linha da seguinte forma:

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
x_1	1	1	1	0	1

A soma de cada elemento x_{ij} com o elemento x_{2j} foi baseada nas seguintes operações lógicas (as quais correspondem a um "AND" lógico):

$$1 + 0 = 1$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 1 = 1$$

$$0 + 0 = 0$$

Do resultado desta operação surge a nova linha x_1 , onde se nota claramente a aparição da adjacência x_3 para o vértice x_1 (caminho de comprimento 2 do vértice x_1). A adição lógica do vértice x_1 com x_3 , por sua vez resulta numa linha cheia de uns, o que implica num Grafo Completo.

O Algoritmo pode ser descrito como segue:

Inicializar o número de Subgrafos C do Grafo em 0.

Inicializar todos os vértices como não pertencentes a nenhum Subgrafo.

1º) O número do Subgrafo a formar é igual a $C + 1$.

2º) Selecionar um vértice i que não pertença a nenhum Subgrafo.

Assinalar o Subgrafo C a este vértice.

3º) Tomar a primeira adjacência j do vértice i que não pertença a nenhum Subgrafo. Quando todas as adjacências j do vértice i pertencerem a um Subgrafo ir ao 6º) passo.

4º) Adicionar logicamente a j -ésima linha com a i -ésima linha.

Assinalar o Subgrafo C a o vértice j .

5º) Verificar se o vértice i apresenta novas adjacências.

5.1) Caso afirmativo, voltar ao 3º) passo.

5.2) Caso negativo, voltar ao 6º) passo.

6º) Verificar se ainda existem vértices na Matriz de Adjacências que não pertençam a nenhum Subgrafo.

6.1) Caso afirmativo, voltar ao 1º) passo.

6.2) Caso negativo, o procedimento finaliza.

O Algoritmo da contração dos Vértices Adjacentes, como se pode constatar através da descrição anterior, precisa só de uma vértice inicial (linha da Matriz de Adjacências) que não pertença a nenhum Subgrafo para, através de adições lógicas com as linhas da Matriz que pertencem às suas adjacências, obter o Grafo da rede.

4.4. ANÁLISE DOS ALGORITMOS APRESENTADOS E ESCOLHA DOS ALGORITMOS A IMPLEMENTAR.

A Tabela 4.1, adiante, mostra um quadro geral esquemático resumindo as principais características dos Algoritmos apresentados. Está montada de acordo com o tipo de representação utilizado para o Grafo G, de acordo com a técnica utilizada para resolver o problema e com um resumo de vantagens e desvantagens que cada um deles apresenta.

Os principais critérios para escolha dos Algoritmos para a implementação dos programas de Configuradores de Rede foram as seguintes:

- ocupação de espaço de Armazenamento no Computador (memória requerida) e
- Requisitos de Tempo de computação (Tempo de Cálculo).

A seguir se apresentam as diversas ponderações que levaram as escolhas dos Algoritmos a serem implementados.

4.4.1. Algoritmos que usam a Representação por meio de Listas e a técnica de visita aos vértices

Entre os Algoritmos que usam a Representação por meio de listas e a técnica de visita aos vértices estão os seguintes Algoritmos:

- Algoritmo de Paton ou Algoritmo dos Circuitos Fundamentais e
- Algoritmo de Dijkstra.

Dado que a técnica dos dois algoritmos é a de visita aos vértices, a sugestão é adotar uma única forma de trabalho, que é a de visitar um vértice aproveitando para incluir seus vértices adjacentes através dos arcos incidentes. Adota-se um procedimento que toma do Algoritmo de Dijkstra a forma de encontrar um caminho, a partir de um vértice previamente escolhido. Já do Algoritmo de Paton se aproveita o conceito de armazenamento de todos os vértices que compõem este caminho em uma fila de espera para uma visita posterior. A razão para que os vértices devam ser visitados posteriormente é que um vértice de um Grafo G pode ter mais de um vértice vizinho e, portanto, surge a possibilidade de existência de tantos caminhos quantos vértices vizinhos existam. Este Algoritmo já foi apresentado na literatura dos Sistemas de Potência por Sasson e outros [2] para Configurar a Rede da "American Electric Power" (AEP), e é utilizado amplamente no âmbito dos Sistemas de Potência [07], [22], [09]. Este será o Algoritmo que irá representar a classe de Algoritmos que requerem que o Grafo seja representado por meio de Listas e que usam a técnica de visita aos vértices do Grafo.

As desvantagens destes métodos ficam por conta do armaze-

namento no computador, já que para obter um tempo razoável de resposta se precisa definir os seguintes conjuntos: (a) Listas dos arcos do Grafo agrupadas por vértice, para garantir uma forma rápida de obter as adjacências do vértice em visita. (b) Filas de espera para os vértices que compõem o caminho e que ainda não foram visitados.

Os tempos de resposta serão testados e comparados com relação aos demais algoritmos no Capítulo VI.

4.4.2. Algoritmos que usam a Representação por meio de Listas e a Técnica de passeio pelos arcos.

Dentre os Algoritmos que usam a Representação por meio de Listas e a técnica de passeio pelos arcos estão os seguintes:

- Algoritmo de Configurador de Redes baseado na Técnica de Passeio pelos Arcos [4].
- Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora.

Como já se explicou, na descrição destes dois algoritmos, o Algoritmo apresentado por Sullivan pode ser melhorado, de forma a obter o Grafo completo em um só passeio pelos arcos do Grafo. Isto de fato conduz a um algoritmo que nada mais é do que a extensão do Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora para a obtenção do Grafo da Rede. Por esta razão se decidiu implementar o Algoritmo da Árvore Geradora para representar os procedimentos que usam a Técnica de passeio pelos arcos do Grafo.

A desvantagem deste algoritmo fica por conta da procura dos vértices que devem trocar de valor (vértices de um Subgrafo a ser fundido num outro Subgrafo). Esta procura deve ser feita

muitas vezes ao longo do passeio pelos arcos e deve-se considerar que um Conjunto de vértices, para o caso de um Sistema de Potência real, pode chegar facilmente a 500. Neste trabalho esta desvantagem foi felizmente ultrapassada, através da implementação de uma lista encadeada dos vértices que compõem cada Subgrafo, de forma que, no momento em que se precisa unir quaisquer dois Subgrafos, basta encadear estas duas listas, sem ter que ir a procura de nenhum vértice.

4.4.3. Algoritmos que usam a Representação por meio da Matriz de Adjacências

Dentre os Algoritmos que usam a Representação por meio da Matriz de Adjacências estão os seguintes:

- Algoritmo das Multiplicações sucessivas da Matriz de Adjacências.
- Algoritmo da contração dos Vértices Adjacentes.

Considerando que o Algoritmo das Multiplicações Sucessivas requer: (a) Uma grande área de ocupação de memória no computador e (b) Muitas multiplicações matriciais, implicando em elevados tempos de resposta, se preferiu adotar o Algoritmo de Fusão de Vértices Adjacentes porque este pode armazenar a Matriz de Adjacências de forma esparsa. Por outro lado, as técnicas de processamento são rápidas e fáceis de implementar. A técnica de adições lógicas nada mais é, em essência, do que uma simples Eliminação de Gauss.

Tabela 4.1 - Resumo esquemático das Principais Características dos Algoritmos apresentados.

ALGORITMO	FUNÇÃO	REPRESENTAÇÃO DO GRAFO	TÉCNICA UTILIZADA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Paton	Obter os Circuitos fundamentais.	Por meio de listas.	Visita aos vértices.	Pode ser estendido para obter o Grafo da Rede.	Armazenamento no computador. Precisa de: - Arcos de Grafo agrupados por vértice. - Filas de Espera de vértices a ser visitadas.
Dijkstra	Obter o caminho do menor valor de um Grafo Valorado.	Por meio de listas.	Visita aos vértices.	Pode ser estendido para obter o Grafo da Rede.	Armazenamento no computador. Precisa de: - Arcos do Grafo agrupados por vértice. - Filas de Espera de vértices a ser visitadas.
Algoritmo para configurar Redes baseado na Técnica de Passeio pelos Arcos. [4]	Obter o Grafo Completo G.	Por meio de listas.	Passeio pelos arcos.	Obtém o Grafo da Rede.	Precisa mais de um passeio completo pelos arcos do Grafo.
Obtenção da Árvore Geradora.	Obter a Árvore Geradora do Grafo G.	Por meio de listas.	Passeio pelos arcos.	Pode ser estendido a obter o Grafo da Rede G. Precisa de um único passeio completo pelo arcos do Grafo.	Procura dos vértices do Subgrafo a ser unido com outro Subgrafo.
Multiplicações sucessivas da Matriz de Adjacências. [6]	Obter o Grafo Completo G.	Por meio da matriz de Adjacências.	Multiplicações Matriciais.	Obtem o Grafo da Rede G.	Armazenamento no computador. Precisa de muito espaço. - Ao ter que fazer muitas multiplicações matriciais requer de muitos cálculos, o que conduz a uma resposta lenta.
Contração de Vértices Adjacentes.	Obter o Grafo Completo G.	Por meio da Matriz de Adjacências.	Adições lógicas das filas da Matriz.	Obtém o Grafo da Rede G. Para cada Subgrafo precisa só de analisar uma linha (vértice) com todas suas adjacências através de adições lógicas (Eliminações de Gauss).	Esforço computacional para armazenar a Matriz de adjacências do Sistema de Potência em forma esparsa. Esforço para nas eliminações de Gauss detectar as novas adjacências.

4.5. CONCLUSÕES DESTE CAPÍTULO

O que se pretendeu neste Capítulo foi apresentar os principais Algoritmos que são oferecidos pela Matemática para resolver problemas específicos da teoria dos Grafos e que podem ser aplicados, com algumas modificações, para resolver o problema da Configuração da Rede dos Sistemas de Potência. Também foram apresentados os principais Algoritmos clássicos, que apareceram na literatura de Sistemas Potência até o presente, para resolver este tipo de problema [2], [4], [6].

Estes Algoritmos foram classificados de acordo com o tipo de representação do Grafo, conforme foi visto no Capítulo III, e de acordo com a técnica de passeio usada (por vértices ou por arcos).

Por último, se realizou uma análise destes Algoritmos sob o ponto de vista da ocupação da memória e dos requisitos de tempo de processamento no computador, de modo a escolher aqueles que, segundo tais critérios parecem poder conduzir aos melhores Algoritmos para Configuração de Subestações e da Rede.

Os Algoritmos eleitos foram: Um Algoritmo padrão representativo da Técnica de visita aos vértices, o Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora e o Algoritmo da contração dos Vértices Adjacentes.

CAPÍTULO V

DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA ATRAVÉS DO COMPUTADOR

5.1. OBJETIVOS DO CAPÍTULO

Neste capítulo se apresentam os fluxogramas das rotinas dos programas computacionais desenvolvidos para a solução do problema de Configuração de Rede, com base nas técnicas selecionadas no Capítulo anterior. Para cada um dos Algoritmos escolhidos foi implementado um Configurador de Subestações e um Configurador de Rede. No total foram implementados seis (6) diferentes programas a partir dos algoritmos acima, que podem ser utilizados para a obtenção da topologia da rede de um Sistema de Potência em Tempo Real.

Antes da implementação das técnicas eleitas é necessário definir uma Base de Dados a ser utilizada. Neste trabalho se optou por desenvolver uma Base de Dados única, a qual armazenará os dados de entrada e os de saída dos Configuradores. Os detalhes referentes à estrutura desta Base de Dados são apresentados neste Capítulo, antes de entrar no detalhe dos Programas implementados.

Para o leitor que não está familiarizado com os termos utilizados recomenda-se, antes de prosseguir na leitura deste Capítulo, uma passagem pelo Apêndice A.

5.2. BASE DE DADOS PARA UM SISTEMA DE POTÊNCIA

Uma rede de um Sistema de Potência de tamanho médio, como por exemplo, a Rede 500/230 KV da ELETROSUL, composta por 24 Barras, requer, para configuração das Subestações, a informação referente a 708 Dispositivos Lógicos e 585 nós. Como consequência, a forma de realizar o armazenamento desta informação passa a ser uma primeira questão importante a resolver. Deve-se ter em mente, na especificação dessa estrutura, a busca da melhor forma de organizá-la, de modo a facilitar a sua consulta e atualização, o que consiste basicamente em facilidade de acesso às informações armazenadas, com a minimização dos tempos de acesso e de atualização dos dados.

Os tipos de Bases dos Dados que têm sido utilizadas para armazenar os dados de um Sistema de Potência são basicamente de dois tipos:

- Bases de Dados Relacionais e
- Bases de Dados Hierárquicas

Base de Dados Relacionais

As Bases de Dados Relacionais são utilizadas principalmente em situações onde os requisitos de armazenamento implicam na necessidade de uma estrutura de dados não pré-determinada.

Bases de Dados Hierárquicas

As bases de Dados Hierárquicas são particularmente vantajosas quando os requisitos de armazenamento implicam na necessidade de uma estrutura de dados pré-determinada [23]. As características dos Sistemas de Potência, intrinsecamente hierarquizado, tem ori-

entado a preferência por este último tipo de Base de Dados.

Tal Base de Dados no caso de tais sistemas deve: (a) Proporcionar ligação entre todas as informações necessárias através de cadeias de índices e apontadores, permitindo o acesso aos diversos sub-conjuntos de dados de modo direto e rápido, (b) Armazenar os dados organizados de tal forma a eliminar qualquer necessidade de redundância, minimizando o volume de informações a serem armazenados e os requisitos correspondentes de ocupação de memória e, ao mesmo tempo, evitar a necessidade de controles de consistência.

5.2.1. Estrutura da Base de Dados escolhida para este trabalho

A Base de Dados para os Sistemas de Potência pode ser dividida ainda em duas grandes categorias, de acordo com o tipo de dados:

Dados Estáticos.

Os Dados Estáticos são aqueles que só se modificam quando a rede varia fisicamente. Por exemplo, a entrada em operação ou desclassificação de uma nova subestação, linha de transmissão transformador, unidade de produção etc, implicando em mudanças raras no conteúdo dos arquivos.

Dados Dinâmicos.

Os Dados Dinâmicos são os dados recolhidos pelo Sistema de Aquisição de Dados em tempo real (SCADA). Exemplos destes tipos de dados são: (a) Os estados associados aos Dispositivos Lógicos e (b) Os resultados das Medições Analógicas.

Carregamento dos Dados a partir da Base Estática

Para carregar os Dados a partir da Base Estática torna-se necessário implementar programas especiais que façam este trabalho, partindo das informações disponíveis sobre cada subestação. Para facilitar os desenvolvimentos deste trabalho foi necessário implementar um programa (Apêndice B) que foi criado especialmente para realizar esta tarefa. Tal tarefa é realizada em modo preparatório, que no jargão da informática se denomina de "off-line", e somente quando a rede é alterada fisicamente (entrada ou retirada de equipamentos).

A Base de Dados escolhida para servir de apoio para o desenvolvimento deste trabalho está organizada hierarquicamente por Concessionária, depois por Zona e Subestação, para assim chegar ao Nível de Tensão que reúne todos os equipamentos que constituem a rede. O diagrama organizacional geral desta Base de Dados é apresentado na Figura 5.1 na página seguinte. Note-se, entretanto, que esta organização pode contemplar outras formas de estrutura, tais como aquelas que dividem ainda o Sistema em áreas, ou regiões, constituindo outros níveis de hierarquização.

Na Figura 5.1 transparecem claramente os diversos níveis de hierarquia especificados, discriminados, por exemplo aqui, em doze Sub-conjuntos de dados que são:

- Companhia;
- Zona;
- Subestações;

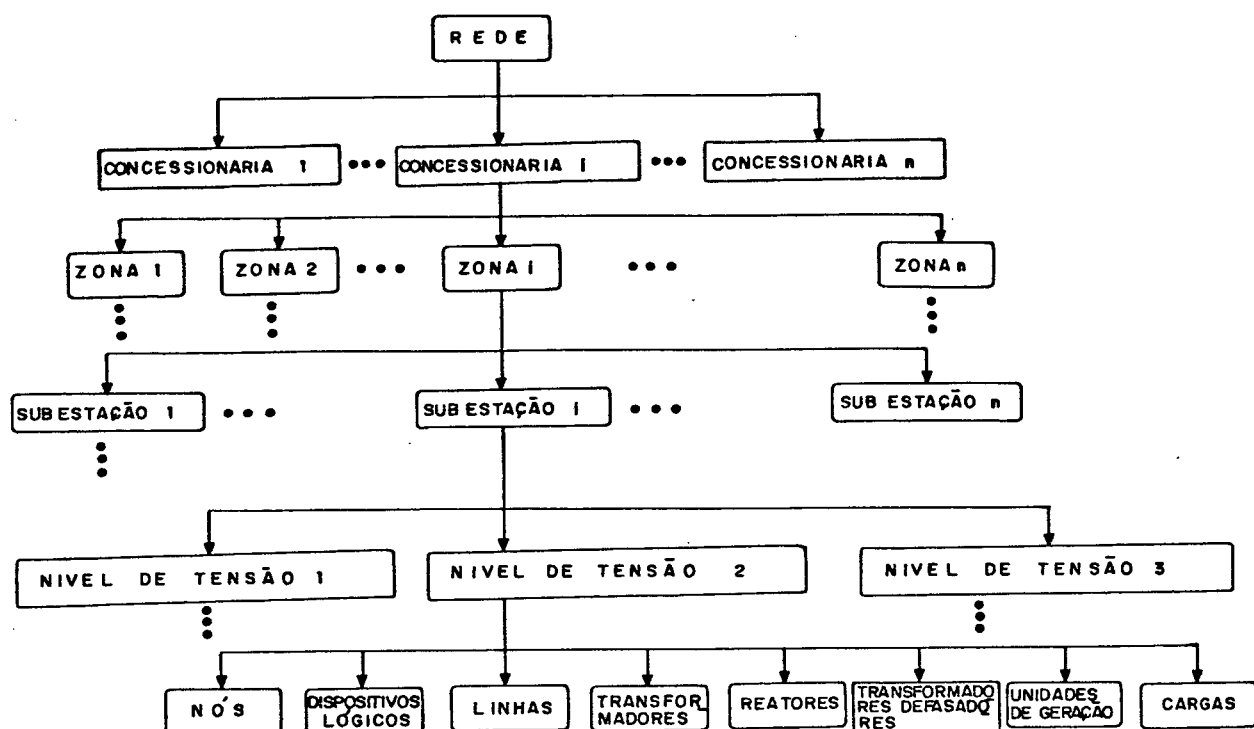


Figura 5.1 - Diagrama Organizacional Geral da Base de Dados Hierárquicos utilizada neste trabalho.

- Níveis de Tensão;
- Nós;
- Dispositivos Lógicos;
- Linhas;
- Transformadores;
- Reatores;
- Transformadores Defasadores;
- Unidades de Geração e
- Cargas.

Todos estes sub-conjuntos devem estar interconectados através de cadeias de apontadores e índices.

Cada sub-conjunto de dados poderá ser armazenado de modo que pareça mais conveniente em função da sua natureza. No caso

particular do Banco de Dados aqui apresentados, optou-se por adotar Estruturas do Tipo Paralelo.

Estrutura do Tipo Paralelo

Um subconjunto de dados de um Banco de Dados se diz estar organizado segundo uma estrutura paralela, quando o descritor do sub-conjunto, i , por exemplo, variando de 1 até N itens (n° de itens armazenados), associa ao elemento i , do sub-conjunto, um número de atributos A_k os quais são armazenados na mesma posição i de k vetores A_k , de modo que $A_1(i), A_2(i), \dots, A_k(i), \dots, A_{NA}(i)$, armazenam os NA atributos do equipamento i .

Sendo o atributo informações que descrevem o elemento, pode-se concluir, que, neste tipo de estrutura, basta localizar i para se ter acesso a todas as informações necessárias para descrevê-lo.

a) Estrutura dos Dados Estáticos de Entrada.

As variáveis apresentadas para definir os Dados Estáticos na Base de Dados da Figura 5.2 e utilizadas pelos programas desenvolvidos são:

Para o Sub-conjunto Subestação:

ISENTP : Apontador do subconjunto Subestação ao Subconjunto Nível de Tensão.

Para o Sub-conjunto Nível de Tensão:

NTNDP : Apontador do Subconjunto Nível de Tensão ao Subconjunto de Nós.

NTDLP : Apontador do Subconjunto Nível de Tensão ao Subconjunto Dispositivo Lógico.

I12XLNi : Primeira Linha do Nível de Tensão i no Subconjunto de Equipamentos da Rede.

I12XTFi : Primeiro Transformador do Nível de Tensão i.

I12XCGi : Primeira Carga do Nível de Tensão i.

I12XUGi : Primeira Unidade de Geração do Nível de Tensão i.

I12XSHi : Primeiro Reator do Nível de Tensão i.

I2XLNTi : Número Total de Linhas do Nível de Tensão i.

I2XTFni : Número Total de Transformadores do Nível de Tensão i.

I2XCGni : Número Total de Cargas do Nível de Tensão i.

I2XUGni : Número Total de Unidades de Geração do Nível de Tensão i.

I2XSHni : Número Total de Reatores do Nível de Tensão i.

Para o Sub-conjunto Nó:

NDDLp : Apontador de Nós aos Dispositivos Lógicos.

JDLNDni : Número de Dispositivos Lógicos do Nó i.

IEQSNDi : Número de Equipamentos Série do Nó i.

ISHNDni : Número de Equipamentos Derivação do Nó i.

Para o Sub-conjunto Equipamentos do Sistema:

NDPXEQi : Nó Inicial do Equipamento i do Sistema.

NDRMEQi : Nó Final do Equipamento i do Sistema.

Para o Sub-conjunto Dispositivo Lógico:

NDPXDLi : Nó Inicial do Dispositivo Lógico i.

NDRMDLi : Nó Final do Dispositivo Lógico i.

JDLXX : Lista de Dispositivos Lógicos a dois elementos.

Como já foi dito no Capítulo anterior, os Algoritmos que usam a técnica de visita aos vértices, para poderem encontrar com maior rapidez as adjacências de um vértice que está sendo visitado, precisam ter os arcos do Grafo (Dispositivos Lógicos) agrupados por vértice (NÓ). Esta foi a razão para a criação do sub-conjunto Dispositivos Lógicos a Dois Elementos.

A razão da criação do sub-conjunto Equipamentos do Sistema, onde se agrupam todos os Equipamentos da Rede, é a de ganhar tempo na etapa de leitura dos dados necessários aos programas, já que com uma única leitura, deste modo, se tem carregados em memória central todos os dados relativos aos Equipamentos do Sistema.

b) Estrutura dos Dados Dinâmicos de Entrada

Os Dados Dinâmicos de entrada para os Configuradores são constituídos pelos seguintes dados:

- Estados dos Dispositivos Lógicos. Estes dados são armazenados também sob a forma de uma estrutura do tipo paralelo ao sub-conjunto de Dispositivos Lógicos. Estes dados são atualizados pelo Sistema de Aquisição de Dados em Tempo Real (SCADA) para cada intervalo de determinado de tempo t de renovação, que em cada Centro de Controle depende do Sistema SCADA implantado e do tamanho da Rede Telemedida.
- Escalar que indica o Modo em que se encontra o Análise de Segurança. Como já se viu no Capítulo II os Modos em que se pode encontrar atuando o Configurador junto à Função de Monitoração da Rede em Tempo Real

são: (a) Modo de Inicialização e (b) Modo de Atualização. Este dado é importante para indicar como deve atuar o Configurador de Subestações, já que no Modo de Inicialização o Configurador realiza a Configuração de todas as subestações do Sistema e no Modo Atualização só reconfigura as subestações onde foram verificadas mudanças em Dispositivos Lógicos.

c) Estrutura de Dados de Saída de um Configurador de Subestações

Dada a necessidade de conferir modularidade aos programas desenvolvidos, todos os Configuradores de Subestações foram projetados para produzirem os mesmos dados de Saída. Estes Dados respeitam a estrutura paralela já adotada para os Dados Estáticos de entrada.

Como o Configurador de Subestações identifica o número de Barras (Subgrafos) em que está dividido cada Nível de Tensão, então é preciso introduzir um novo sub-conjunto para as Barras.

Na Figura 5.3 se apresentam os Dados de Saída de um Configurador de Subestações apresentados em estruturas paralelas aos Sub-conjuntos Barra, Nô e Equipamentos do Sistema. A ligação destes dados com o resto dos Sub-conjuntos da Base de Dados é feita por meio dos apontadores e os índices mostrados na figura 5.2.

As variáveis apresentadas para definir os dados de Saída dos Configuradores de Subestações implementados, e que aparecem na figura 5.3, são:

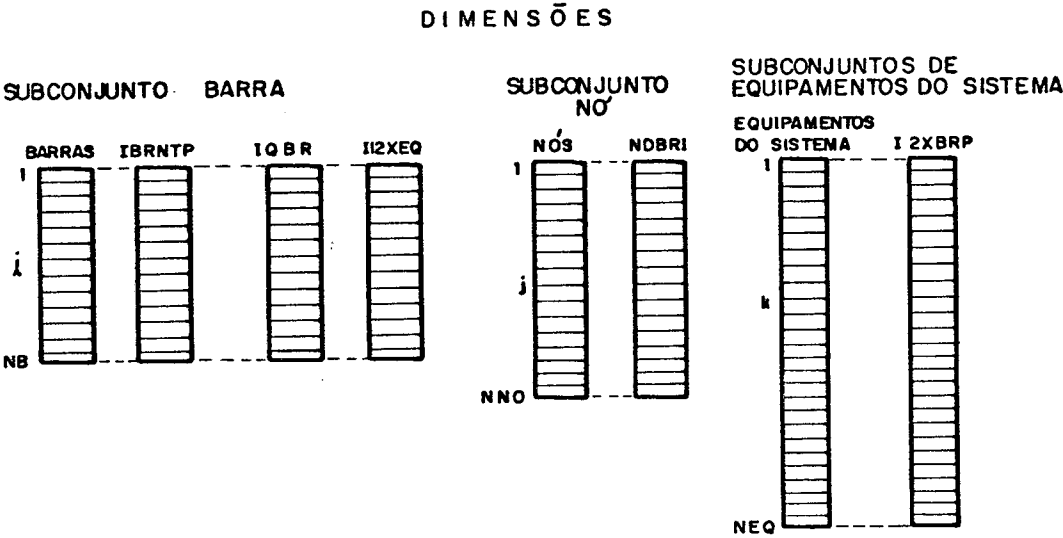


Figura 5.3 - Estrutura de Dados de Saída de um Configurador de Subestações.

Para o sub-conjunto Barra:

- IBRNTP : Barras encadeadas por Nível de Tensão.
- IQBR : Estado da Barra. Os valores contidos nesta tabela são: Valor 0, para quando a Barra é Isolada e Valor 1, quando a Barra é Elétrica.
- I12XEQi: Índice do Primeiro Equipamento da Barra i.

Para o sub-conjunto Nó:

- NDBRI : Contém o número da Barra à qual pertence o Nó.

Para o sub-conjunto Equipamentos do Sistema:

- I2XBRP : Encadeamento dos equipamentos por Barra.

Além destes dados o Programa Configurador de Subestações, baseado no Algoritmo que utiliza a técnica de visita aos vértices, deve produzir o Conjunto de Barras Adjacentes a cada Barra encontrada. Isto é devido a que o Programa Configurador de Rede

baseado neste Algoritmo, do mesmo modo que o Configurador de Subestações, precisa acessar de modo mais rápido possível as adjacências das Barras (vértices) visitadas.

d) Estrutura de Dados de Saída de um Configurador de Rede

Da mesma forma que para os Configuradores de Subestações, os Configuradores de Rede foram projetados para produzirem os mesmos dados de saída. Dado que os Configuradores de Rede identificam as Áreas (Subgrafos) em que está dividida a Rede Total, foi preciso criar um novo sub-conjunto para a informação referente a estas Áreas.

Na Figura 5.4 se apresentam os Dados de Saída de um Configurador de Rede, estes dados são apresentados em estruturas paralelas aos Sub-conjuntos área, Barra e Equipamentos do Sistema. A ligação destes dados com o resto dos Sub-conjuntos da Base de Dados também é feita por meio dos apontadores e os índices mostrados na Figura 5.2

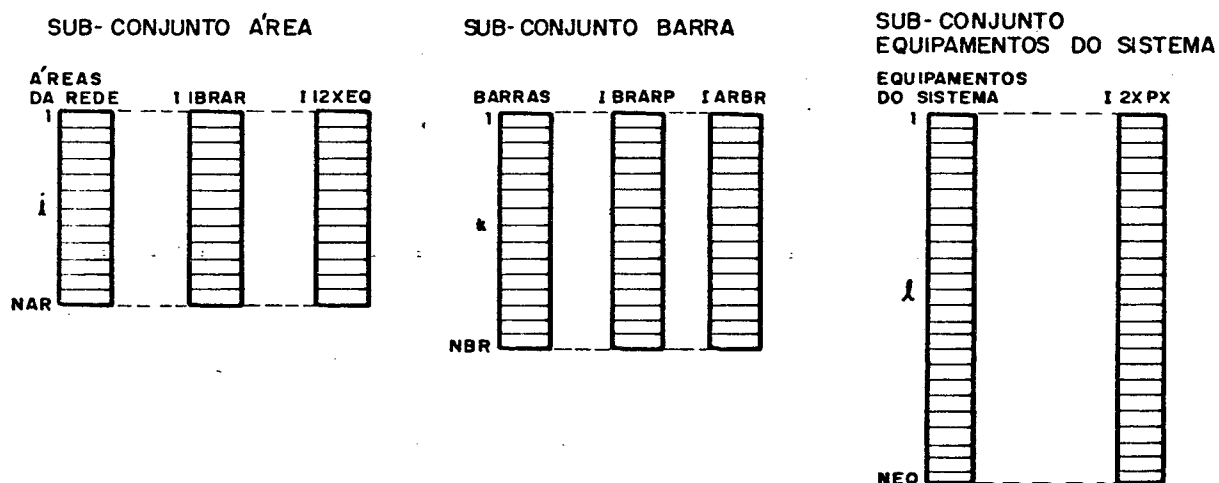


Figura 5.4 - Estrutura de Dados de Saída de um Configurador de Rede.

As variáveis apresentadas para definir os dados de Saída dos Configuradores de Rede implementados e que aparecem na figura 5.4 são:

Para o sub-conjunto Área:

IlBRARi : Indicador no Subconjunto Barra da localização da Primeira Barra da Área i.

Il2XEQi : Indicador no Subconjunto Equipamento da localização do primeiro Equipamento da Área i.

Para o sub-conjunto Barra:

IBRARP : Encadeamento de Barras por Área.

IARBR : Área a que pertence a Barra.

Para o sub-conjunto Equipamentos do Sistema:

I2XPX : Encadeamento de Equipamentos por Área.

5.3. CONFIGURADORES DE SUBESTAÇÕES DESENVOLVIDOS

A seguir são apresentados a organização geral e os diagramas de fluxo dos programas desenvolvidos para os Algoritmos escolhidos no Capítulo IV.

5.3.1. Programa Configurador de Subestações baseado nos Algoritmos que utilizam a técnica de visita aos vértices.

O Configurador de Subestações baseado nos Algoritmos que utilizam a técnica de visita aos vértices, mostrando a composição geral e os Fluxogramas de cada componente do Programa desenvolvido, e apresentado a seguir.

O Programa é constituído do programa principal e de um total de oito sub-rotinas, estando organizado como segue:

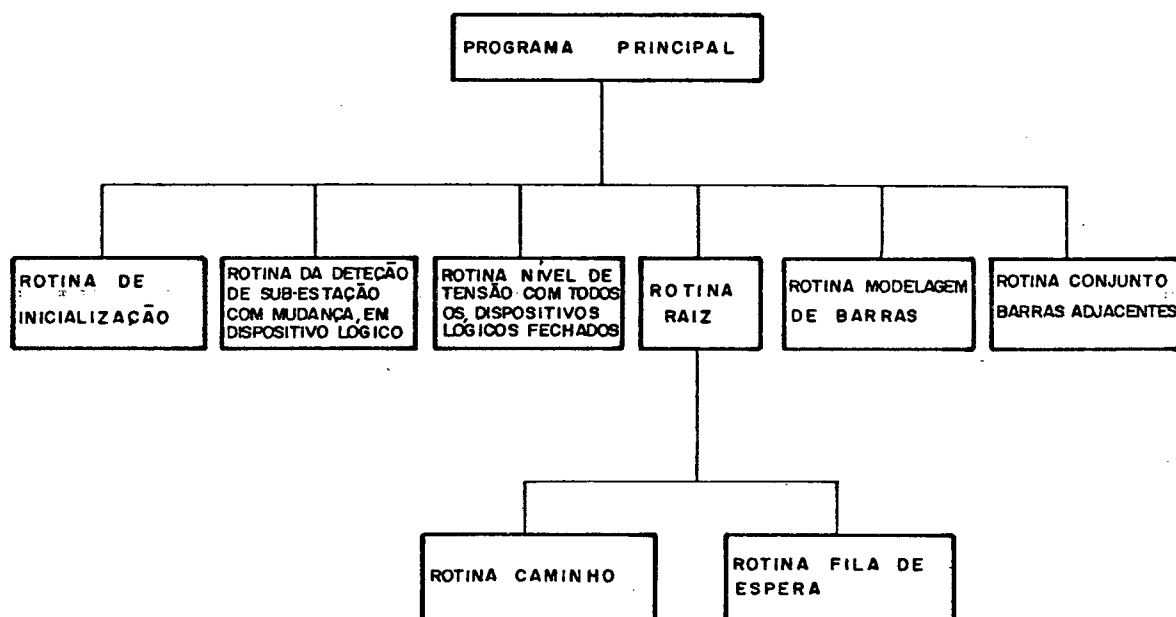


Figura 5.5 - Organização Geral do Programa baseado no algoritmo de visita aos vértices.

A seguir se faz uma breve descrição de cada componente do Configurador de Subestações, para depois mostrar seu Diagrama de Fluxo.

Programa Principal.

O Programa Principal dirige a execução das Rotinas do Configurador de Subestações, deteta se é a primeira vez que o Configurador é chamado ou se, ao contrário, ele já foi inicializado, caso em que procura detetar em quais das subestações há mudança de configuração, para então só reconfigurar tais Subestações.

Rotina de Inicialização.

Esta Rotina é chamada somente na Etapa de Inicialização. Os objetivos desta Rotina são: (a) Marcar todas as Subestações para que sejam analisadas pelo Configurador, (b) Fazer as inicializações necessárias para as próximas chamadas ao Configurador.

Rotina da Detecção de Subestação com Mudança em Dispositivo Lógico

Esta Rotina é chamada sempre na Etapa de Atualização e seu objetivo é detetar as Subestações do Sistema de Potência nas quais se constata alguma mudança no estado dos seus Dispositivos Lógicos.

Rotina Nível de Tensão com todos os Dispositivos Lógicos Fechados

Esta Rotina é chamada sempre que um Nível de Tensão de uma Subestação tem todos seus Dispositivos Lógicos fechados e, portanto, todos os Nós do Nível de Tensão pertencem a uma mesma Barra.

Rotina Raiz

Esta Rotina escolhe o nó que será utilizado para começar a busca de um Caminho através de Dispositivos Lógicos Fechados. Este nó é escolhido como qualquer um dos nós de um Dispositivo Lógico aberto. Uma vez escolhido este nó o procedimento é o seguinte: (a) Se o nó escolhido tem mais de um Dispositivo Lógico conectado, então este nó é armazenado numa Fila de Espera para posterior reconsideração, (b) é chamada a Rotina Caminho para que encontre um Caminho completo a partir deste nó escolhido através de Dispositivos Lógicos fechados. Logo que se tenha obtido este cami-

nho, se a Fila de Espera tem vértices a espera para serem processados, chama-se à Rotina Fila de Espera.

Rotina Caminho.

Esta Rotina por meio da visita aos nós do Grafo obt m um Caminho, através de Dispositivos Lógicos fechados.

Rotina Fila de Espera

Esta Rotina analisa cada nó armazenado na Fila de Espera. A atenção dada aos nós é de acordo com uma Fila de Espera tipo LIFO (Last-In, First-Out) [40].

Rotina Modelagem de Barras

Esta Rotina determina se as Barras (Subgrafos) em que está dividida uma Subestac  o são Barras Elétricas ou Barras Isoladas.

Rotina Conjunto de Barras Adjacentes.

Esta Rotina forma o número e o Conjunto de Barras Adjacentes a cada Barra de cada Subestac  o. A necessidade deste Conjunto de Adjacências surge porque um Configurador de Rede baseado neste Algoritmo precisa saber se uma Barra sob Análise deve ficar ou não na Fila de Espera.

Os seguintes são os Diagramas de Fluxo do Programa Principal e as Rotinas componentes do Configurador de Subestac  es.

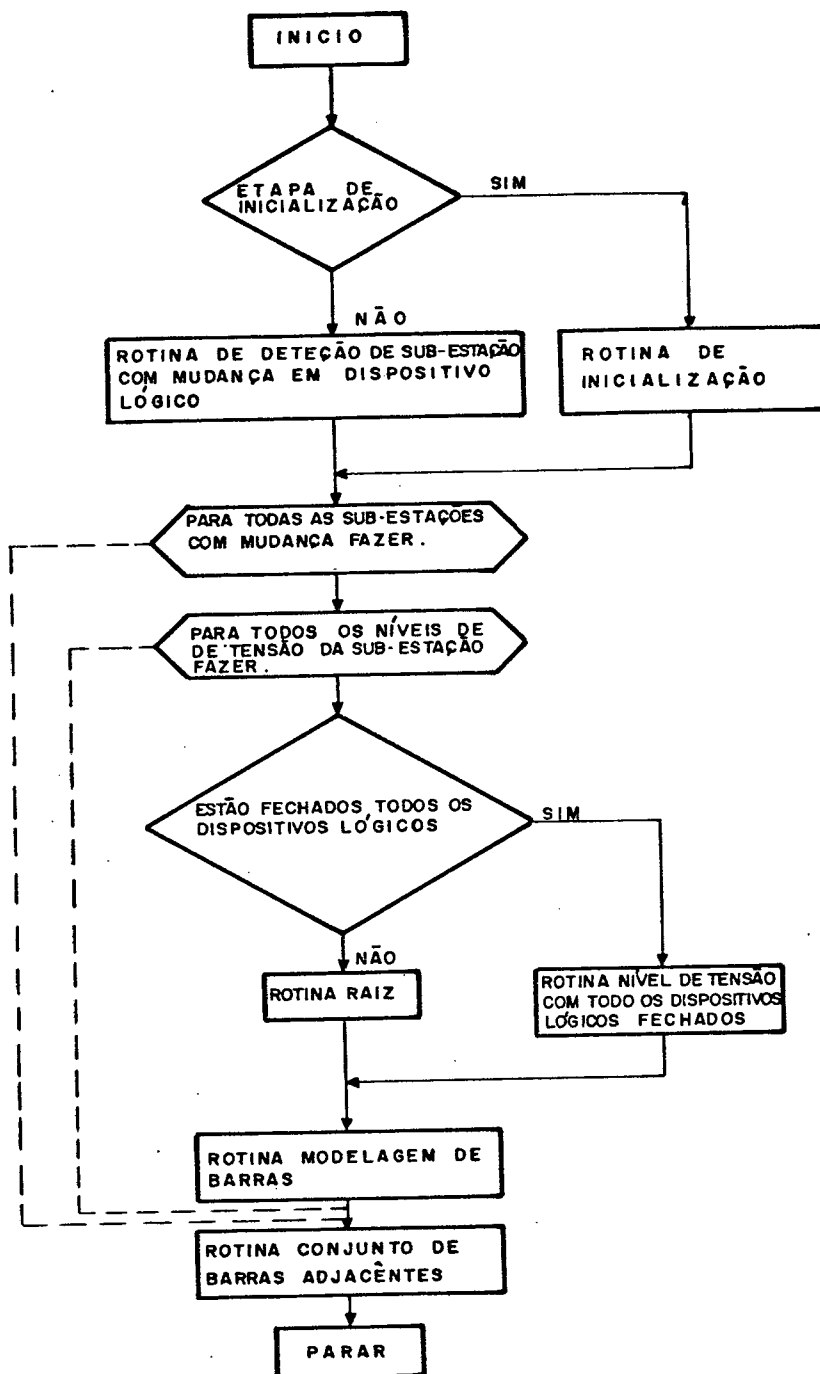


Figura 5.6 - Diagrama de fluxo do programa Principal do Configurador de Subestações baseado no Algoritmo que utiliza a técnica de visita as vértices.

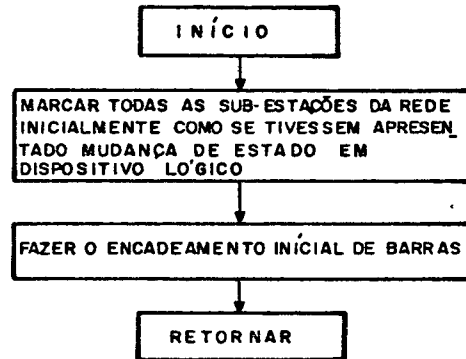


Figura 5.7 - Diagrama de Fluxo da Rotina Inicialização.

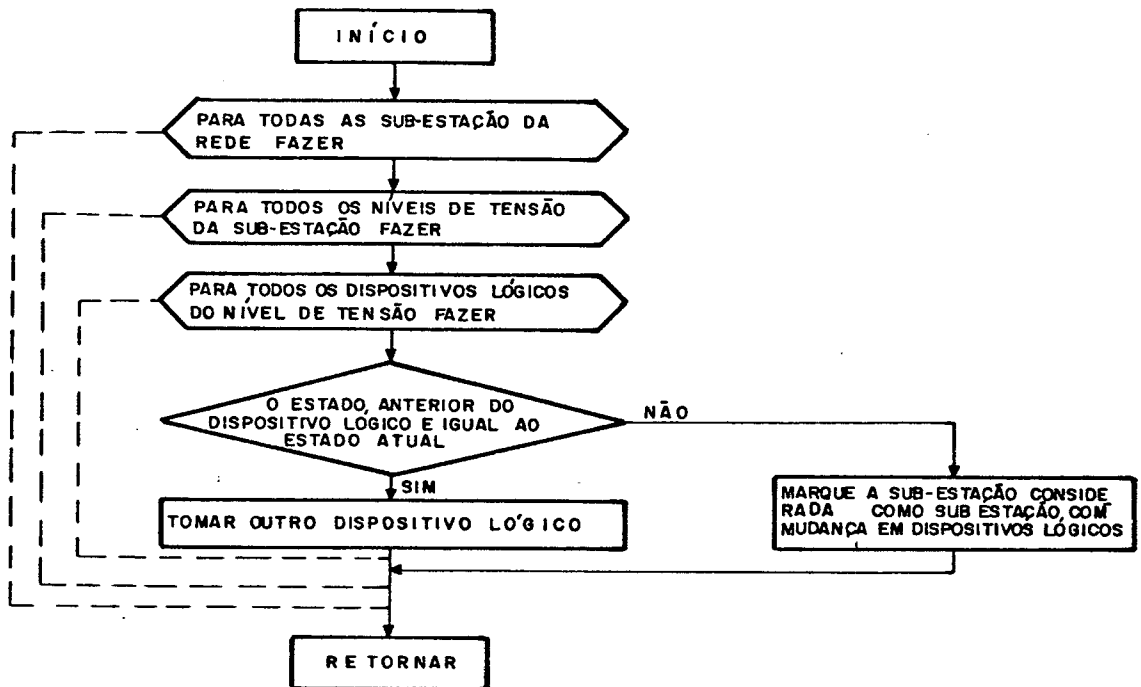


Figura 5.8 - Diagrama de Fluxo da Rotina Detecção de Subestação com Mudança em Dispositivo Lógico.

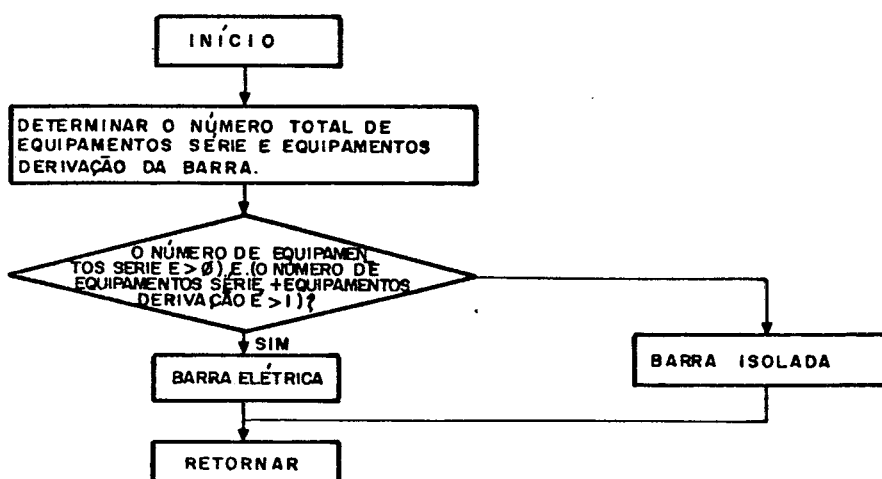


Figura 5.9 - Diagrama de Fluxo de Rotina Nível de Tensão com todos os Dispositivos Lógicos fechados.

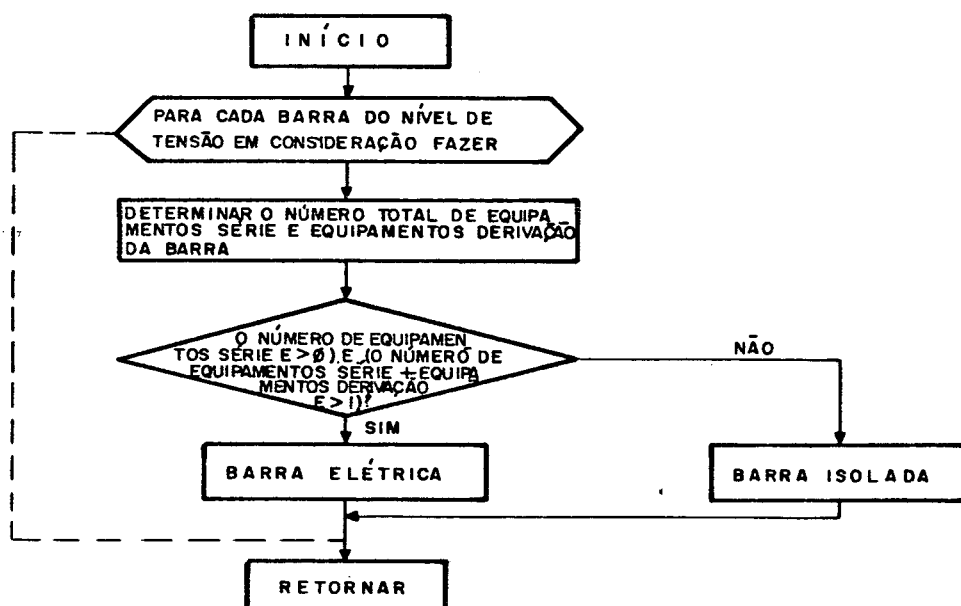


Figura 5.10 - Diagrama de Fluxo da Rotina Modelagem de Barras.

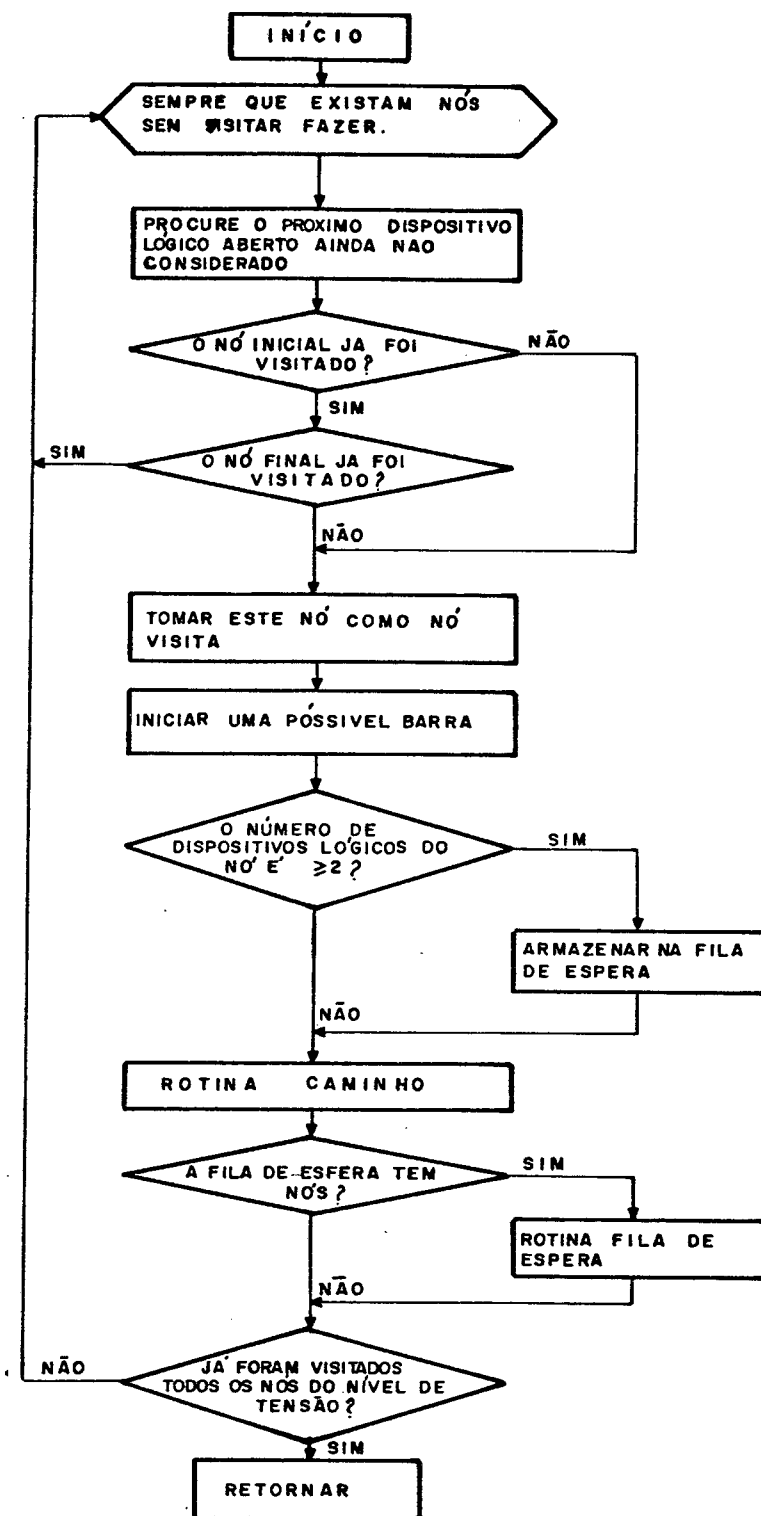


Figura 5.11 - Diagrama de Fluxo de Rotina Raiz.

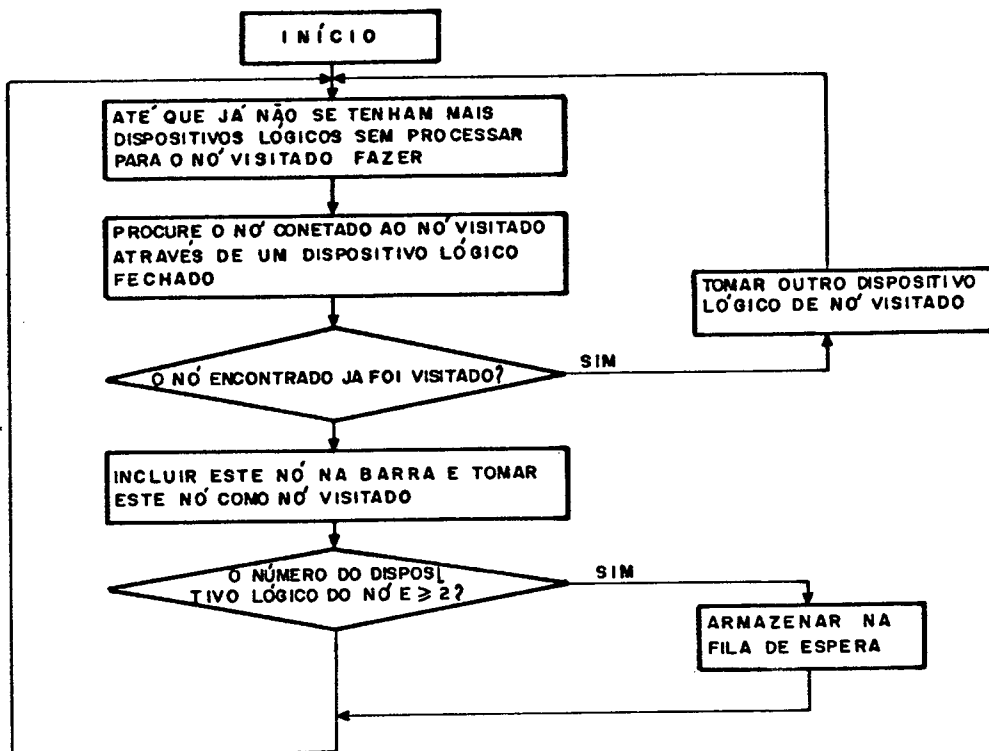


Figura 5.12 - Diagrama de Fluxo de Rotina Caminho.

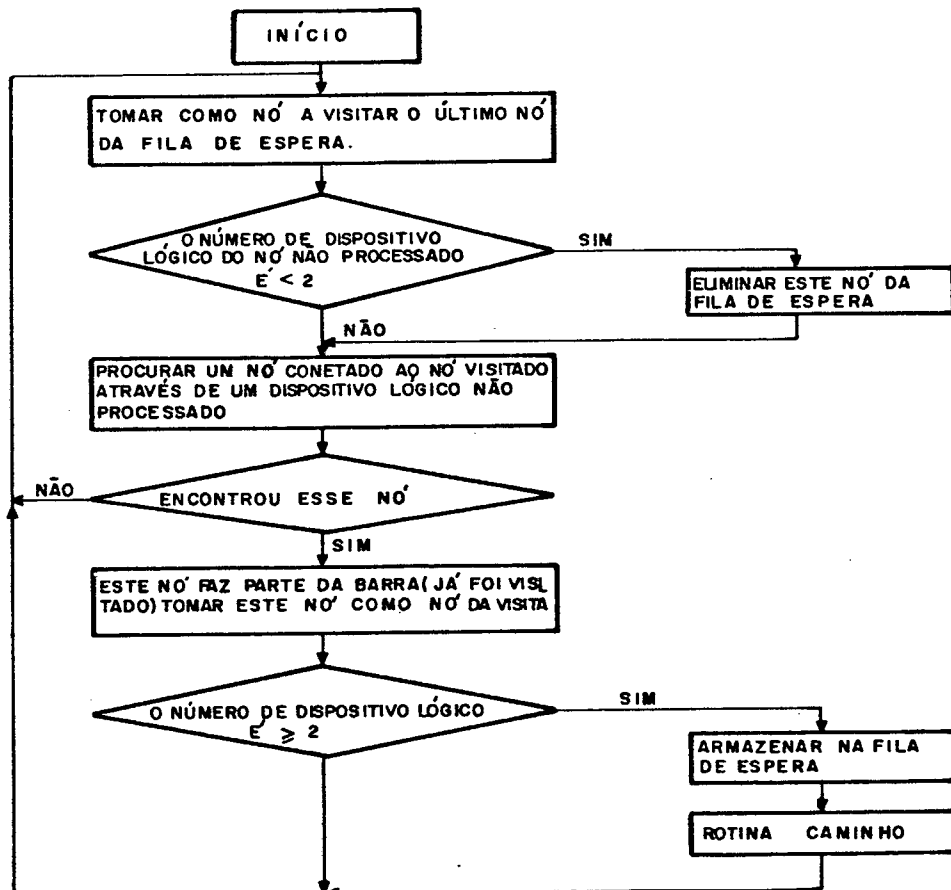


Figura 5.13 - Diagrama de Fluxo da Rotina Fila de Espera.

5.3.2. Programa Configurador de Subestações baseado no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora

A seguir é apresentado o Configurador de Subestações baseado no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora, mostrando a composição geral de programa e os Fluxogramas de cada componente do Programa desenvolvido.

O Programa é composto de 1 programa principal, 3 Rotinas e 3 procedimentos específicos assim:

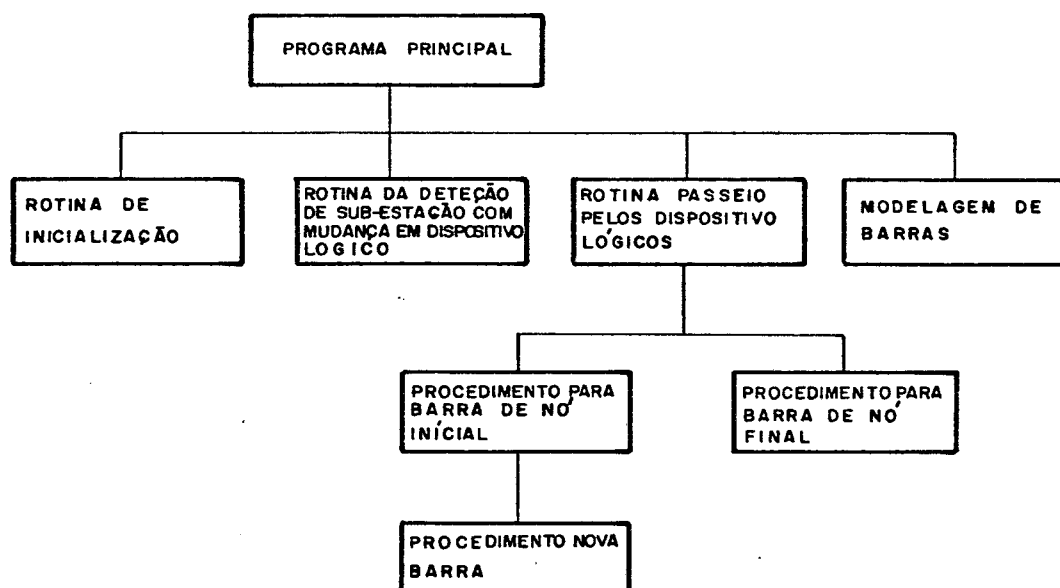


Figura 5.14 - Organização Geral do Programa baseado no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora.

A seguir se faz uma breve descrição de cada componente deste Configurador de Subestações, para depois mostrar seu Diagrama de Fluxo.

Programa Principal

O Programa Principal dirige a execução das Rotinas de Configurador de Subestações, deteta se é a primeira vez que o Configurador está sendo chamado ou se, ao contrário, ele já foi chamado anteriormente, para então detetar qual das subestações teve sua configuração alterada e assim só reconfigurar tal Subestação.

Rotina de Inicialização

Esta Rotina é chamada somente na Etapa de Inicialização. Os objetivos desta Rotina são: (a) Marcar todas as Subestações para que sejam analisadas pelo Configurador, (b) Fazer as inicializações necessárias para as próximas chamadas do Configurador.

Rotina de Detecção de Subestação com Mudança em Dispositivo Lógico

Esta Rotina é chamada sempre na Etapa de Atualização e seu objetivo é detetar as Subestações do Sistema de Potência para os quais houve alguma mudança no estado de seus Dispositivos Lógicos.

Rotina Passeio pelos Dispositivos Lógicos (arcos).

Esta Rotina faz um passeio pelos Dispositivos Lógicos (arcos) dos Níveis de Tensão de cada Subestação do Sistema de Potência, determinando de uma única vez as Barras (Subgrafos) em que está subdividido um Nível de Tensão de uma determinada subestação.

A seguir são apresentados os Diagramas de Fluxo de Rotinas que constituem o Configurador de Subestações.

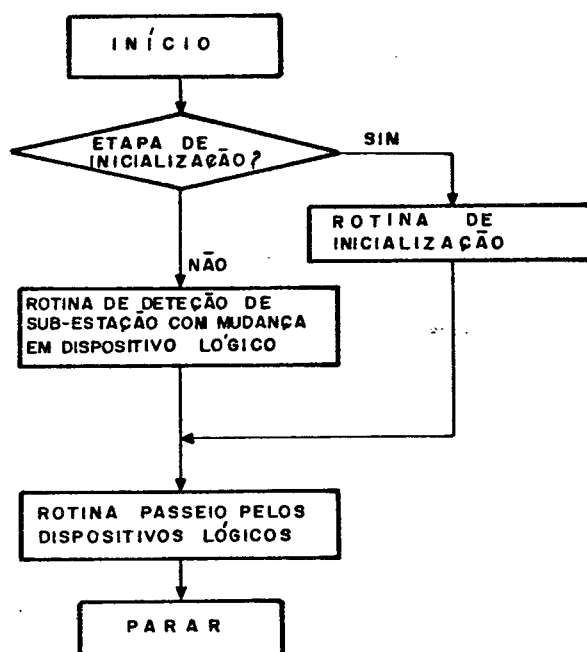


Figura 5.15 - Diagrama de Fluxo do Programa Principal do Configurador de Subestações baseado no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora.

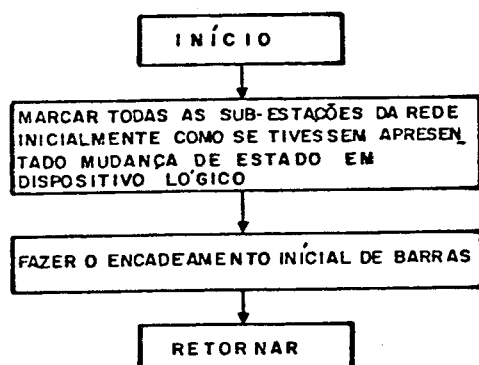


Figura 5.16 - Diagrama de Fluxo de Rotina Inicialização.

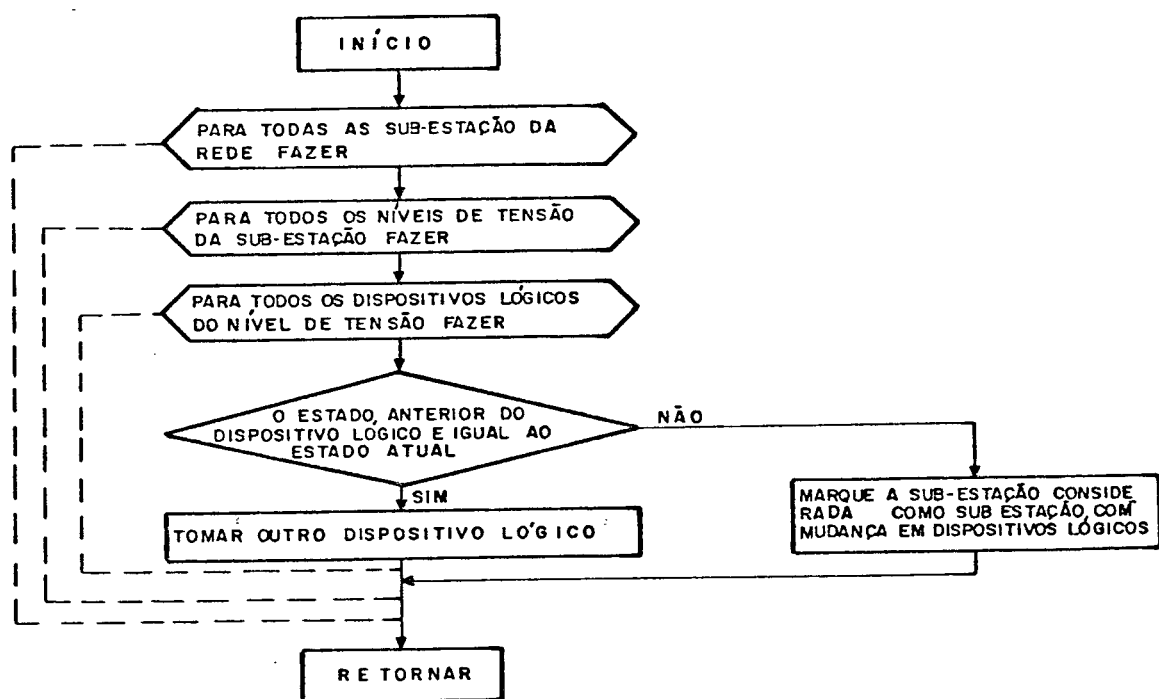


Figura 5.17 - Diagrama de Fluxo da Rotina Detecção de Subestação com Mudança em Dispositivo Lógico.

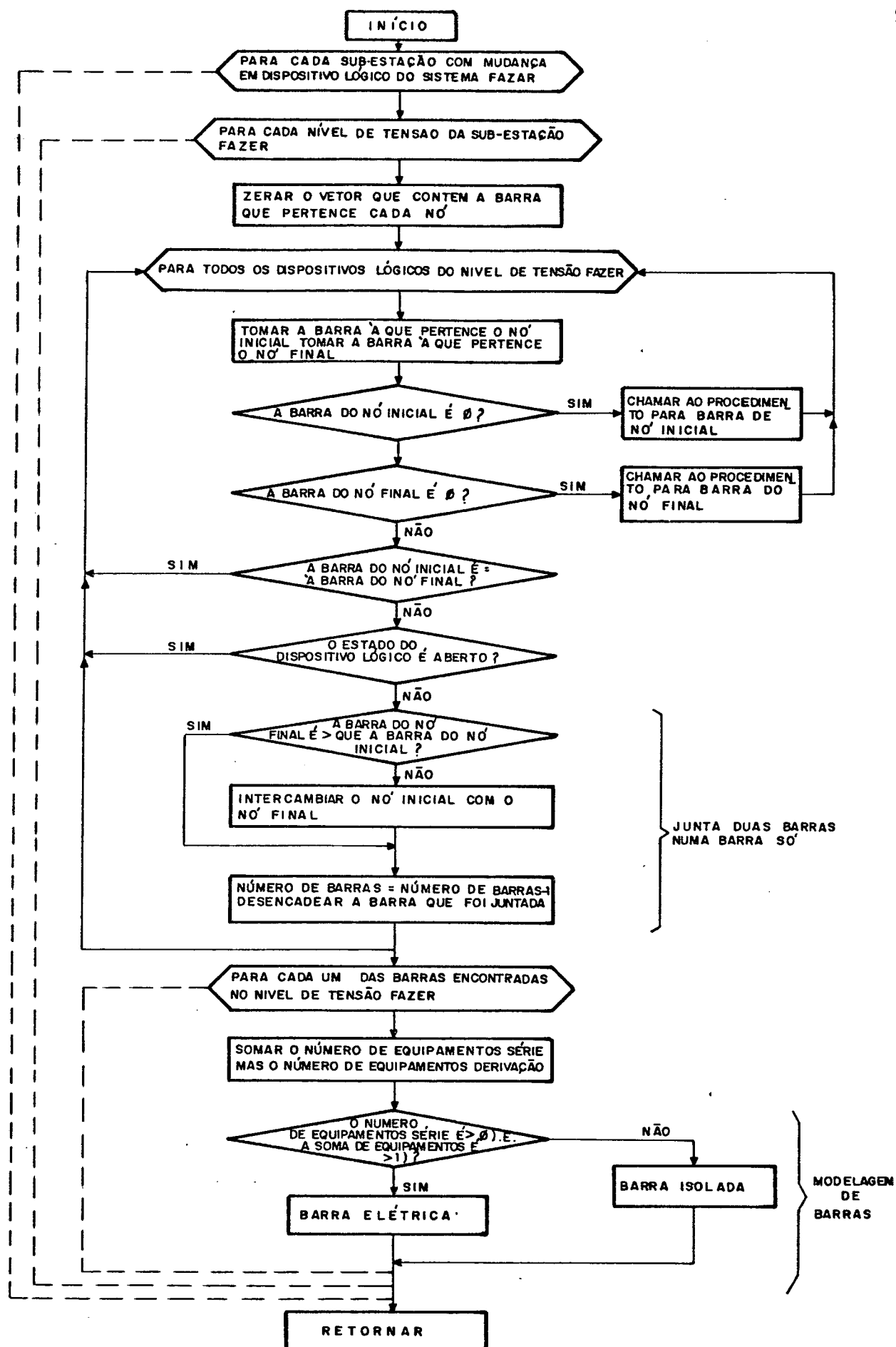


Figura 5.18 - Diagrama de Fluxo da Rotina Passeio pelos Dispositivos Lógicos.

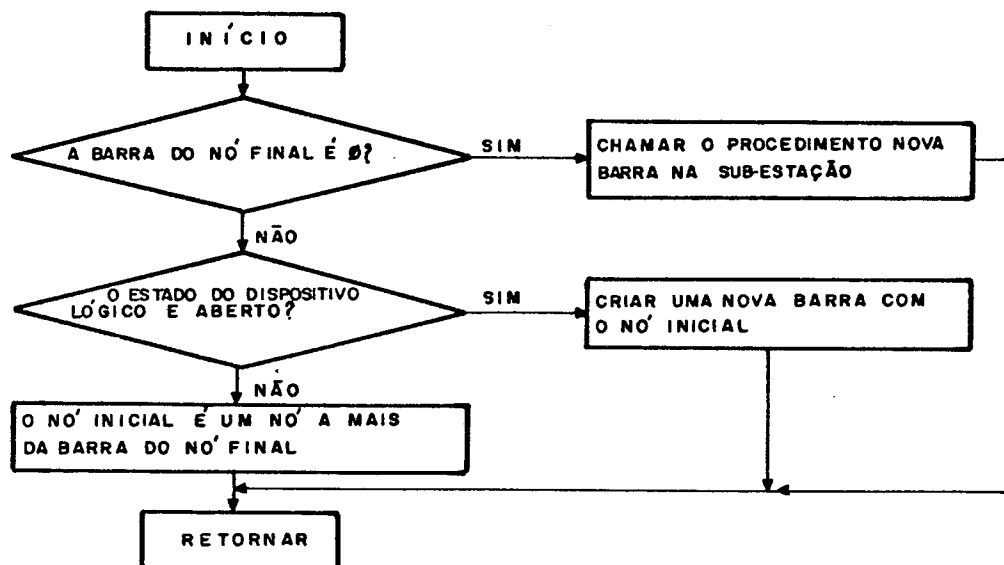


Figura 5.19 - Diagrama de Fluxo para o Procedimento de Criação de Barra a partir do Nó Inicial.

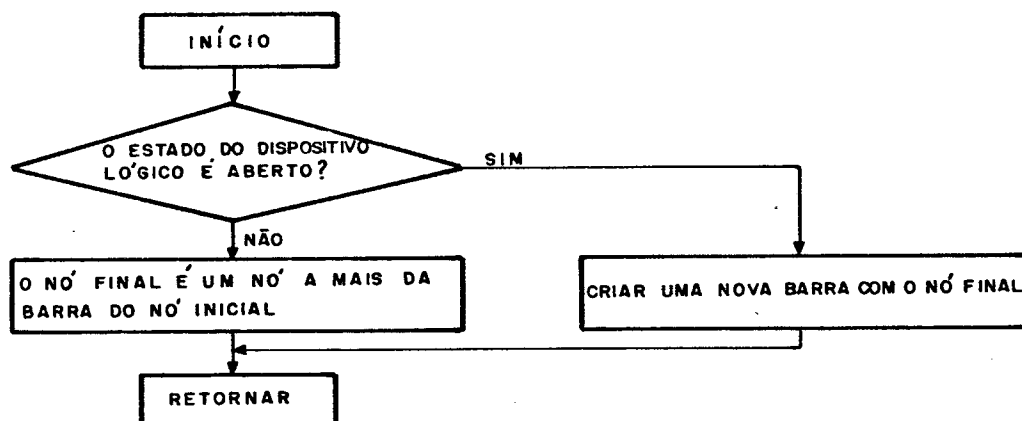


Figura 5.20 - Diagrama de Fluxo para o Procedimento de Criação de Barra a partir do Nó Final.

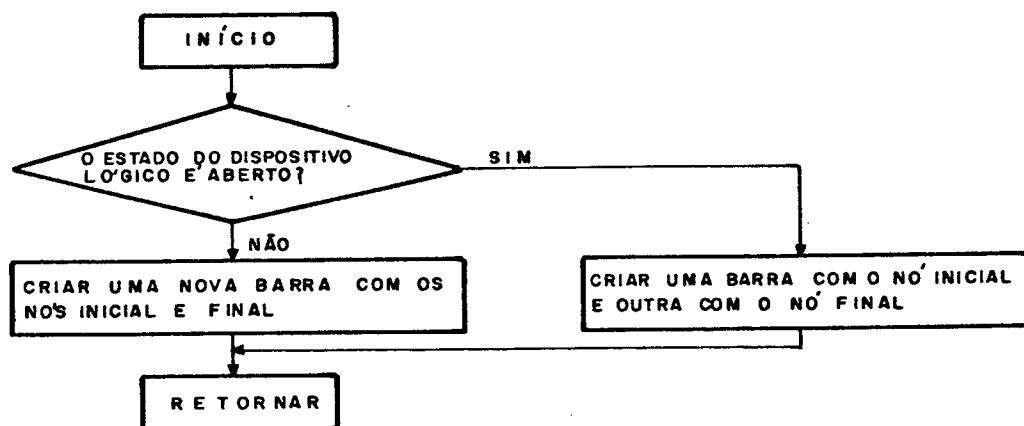


Figura 5.21 - Diagrama de Fluxo para o Procedimento
Nova Barra na Subestação.

5.3.3. Programa Configurador de Subestações baseados no Algoritmo de Contração de Vértices Adjacentes

A seguir é apresentado o Configurador de Subestações baseado no Algoritmo de Contração de Vértices Adjacentes, mostrando a composição geral do programa e os Fluxogramas de cada componente do Programa desenvolvido.

O Programa é composto de 1 programa principal e 3 rotinas assim:

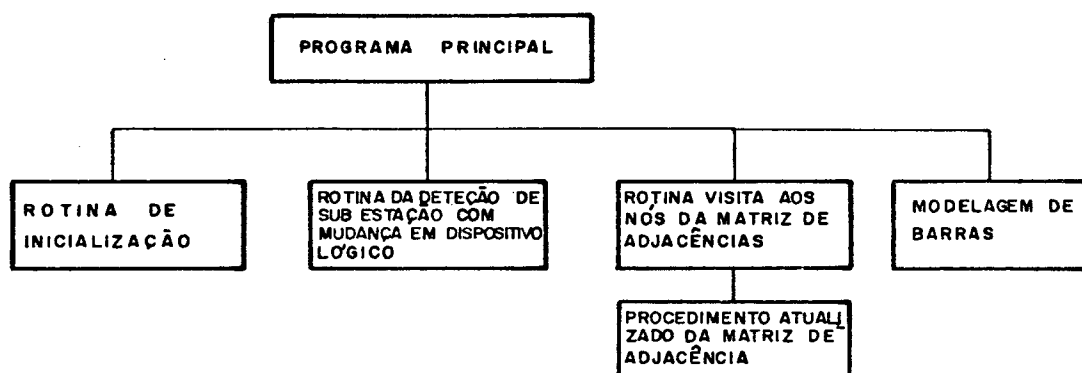


Figura 5.22 - Organização Geral do Programa baseado no Algoritmo de Contração de Vértices Adjacentes.

A seguir se faz uma breve descrição de cada rotina que constitui este Configurador de Subestações, para depois mostrar seu Fluxograma.

Programa Principal.

O Programa Principal dirige a execução das Rotinas do Configurador de Subestações, deteta se é a primeira vez que o Configurador é chamado ou se, ao contrário, ele já foi inicializado. Nesse caso procura detetar qual das subestações teve mudança de configuração, para assim só reconfigurar esta Subestação.

Rotina de Inicialização.

Esta Rotina é chamada somente na Etapa de Inicialização. Os

objetivos desta Rotina são: (a) Marcar todas as Subestações para que sejam analisadas pelo Configurador, (b) Fazer as inicializações necessárias para as próximas chamadas do Configurador.

Rotina de Detecção de Subestação com Mudança em Dispositivo Lógico

Esta Rotina é chamada sempre na Etapa de Atualização e seu objetivo é detetar as Subestações do Sistema de Potência nas quais houve mudança no estado de seus Dispositivos Lógicos.

Rotina Visita aos Nós da Matriz de Adjacências

Esta Rotina toma o primeiro nó (vértice) da Matriz de Adjacências ainda não visitado. Uma vez que se conheça este nó começa-se a fazer adições lógicas entre a linha da Matriz pertencente a este nó e as linhas dos nós adjacentes. Quando já não se tem mais nós adjacentes a analisar, uma Barra é alcançada.

Os Diagramas de Fluxo das diversas componentes do Configurador de Subestações são apresentadas a seguir.

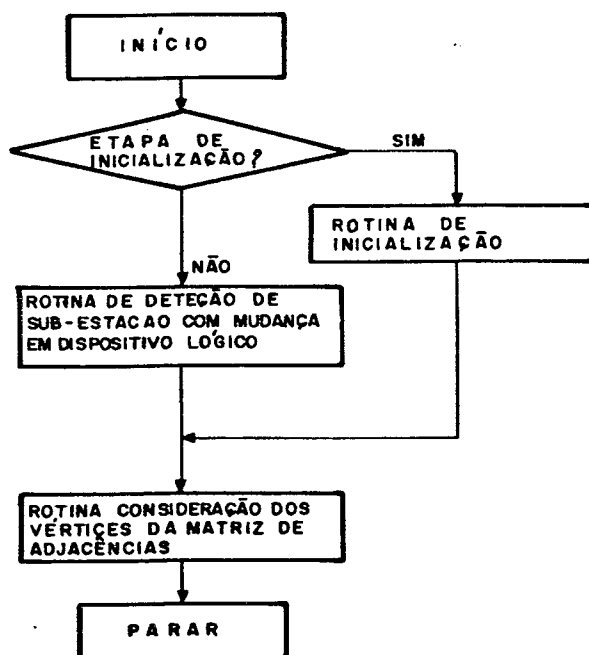


Fig.5.23 - Diagrama de Fluxo do Programa Principal do Configurador de Subestações baseado no Algoritmo de Fusão de Vértices Adjacentes.

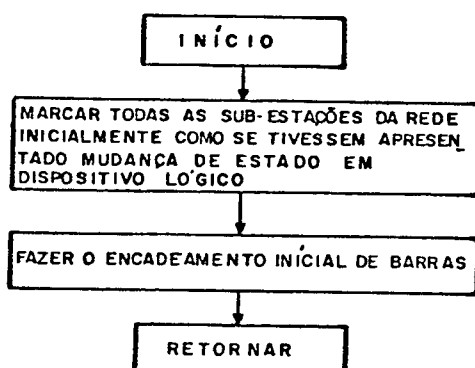


Figura 5.24 - Diagrama de Fluxo de Rotina Inicialização.

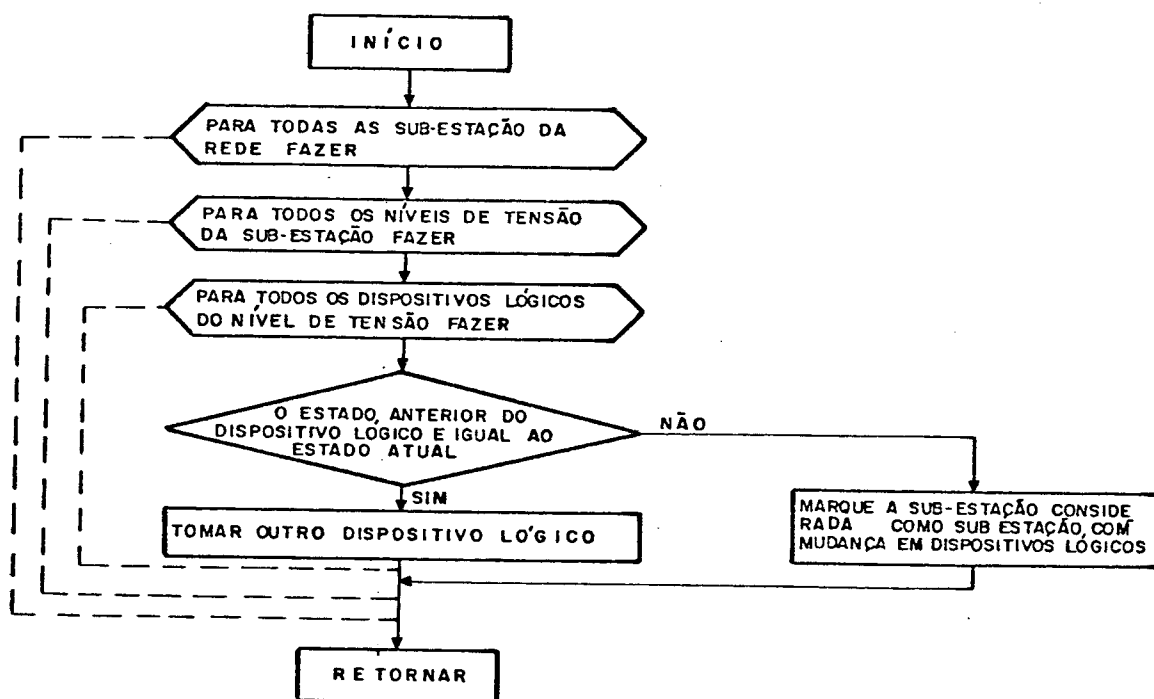


Figura 5.25 - Diagrama de Fluxo de Rotina Detecção de Subestação com Mudança em Dispositivo Lógico.

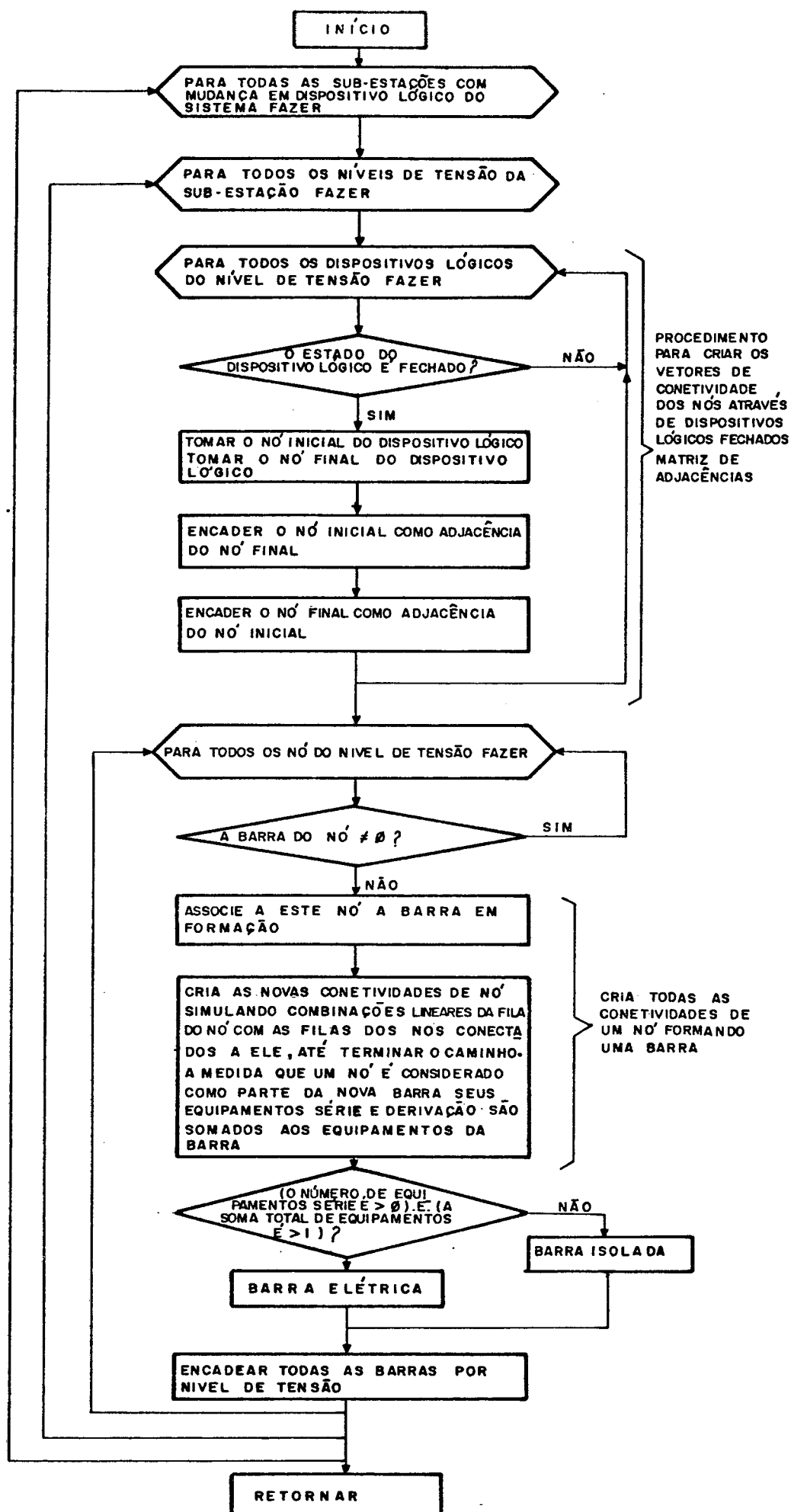


Figura 5.26 - Diagrama de Fluxo de Rotina Visita aos Nós da Matriz de Adjacências.

5.4. CONFIGURADORES DE REDE DESENVOLVIDOS

O Grafo global G da rede pode ser obtido também através de qualquer destes três algoritmos escolhidos no Capítulo IV. Por esta razão a apresentação dos fluxogramas dos Configuradores de rede desenvolvidos levaria à apresentação uma quantidade razoável de material redundante, já que basta considerar nos Configuradores de Subestações os Equipamentos Série como Dispositivos Lógicos e as Barras como Nós.

5.5. CONCLUSÕES DESTE CAPÍTULO

O objetivo principal deste Capítulo foi apresentar os programas implementados para os Algoritmos eleitos no Capítulo anterior. Estes Configuradores foram implementados com todas as opções requeridas pelas Funções da Análise de Segurança em Tempo Real, para Sistemas reais.

Para atingir o objetivo da implementação dos Configuradores de uma forma eficiente foi necessário criar uma Base de Dados com características tais que permitem cumprir este objetivo. Esta Base de Dados corresponde a uma Base de Dados Hierárquica e sua estrutura é tal como apresentada no item 5.2 deste Capítulo.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

6.1 - OBJETIVOS DO CAPÍTULO

Neste Capítulo são apresentados e analisados os resultados da utilização dos Configuradores de Rede programados com base nos algoritmos eleitos no Capítulo anterior. Estes programas foram testados sobre seis sistemas elétricos para formarem um conjunto de teste de referência. O primeiro foi construído para fins apenas didáticos, de apresentação e ilustração do modo de entrada e saída de dados. O segundo é um sistema de oito barras baseado em configurações típicas de subestações do Sistema elétrico da Colômbia. O terceiro e quarto são sistemas teste encontrados na literatura em Sullivan e outros [4] e em Bezerra e outros [22]. O quinto é baseado no Sistema IEEE de 14 barras e o sexto, e último corresponde ao Sistema 500/230 KV do Sul do Brasil, envolvendo cerca de 708 Dispositivos Lógicos e 585 Nós.

Os Diagramas Unifilares das cinco primeiras redes são apresentados adiante e os da Rede Sul do Brasil apresentados no Apêndice C.

Os dados de entrada/saída dos últimos cinco Sistemas não são apresentados. Isto conduziria a uma quantidade razoável de material redundante, cuja apresentação avolumaria muito este trabalho. Estes dados, seguindo a estrutura básica apresentada, estão à disposição dos interessados no Laboratório de Sistemas de

Potência (LABSPOT) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os dados do Sistema da ISA da Colômbia e da ELETROSUL, só poderão ser repassados com autorização prévia das empresas.

Para o sistema teste de Bezerra [22] e o Sistema do IEEE 14 barras foram feitos testes adicionais, abrindo Dispositivos lógicos de forma a dividir esta rede em duas áreas. Isto leva a que, ao final, os 6 programas desenvolvidos tenham sido testados sobre 8 redes em Modo de Inicialização. Realizou-se também um teste em Modo de Atualização com a Subestação de Salto Osório (66 Dispositivos Lógicos e 47 Nós), que é a maior subestação dentro da topologia do Sistema Sul do Brasil.

Os resultados, em termos dos tempos de cálculo, verificamos sobre o Computador IBM 4341 da UFSC, para os vários programas desenvolvidos, para cada um dos Sistemas citados, são apresentados ao final.

6.2. DESCRIÇÃO DE UM CONJUNTO DE REDES DE REFERÊNCIA UTILIZADAS PARA TESTE DOS CONFIGURADORES

As redes de referência utilizadas para teste dos Configuradores desenvolvidos foram as seguintes:

Sistema Exemplo Didático

O Sistema Exemplo Didático foi desenvolvido dentro do contexto deste trabalho de modo a permitir a apresentação do formato dos dados, tanto de entrada como de saída para os Configuradores desenvolvidos. Para os demais Sistemas Testes estes dados não serão apresentados devido ao grande volume de informação que é gerado. O Sistema Didático consiste de: 2 Subestações, 4 elementos no Sub-conjunto Nível de Tensão, 3 linhas, 2 transfor-

madores, 1 Reator, 1 carga, 8 Dispositivos Lógicos e um número total de 12 Nós. Os dados referentes a este sistema são apresentados a seguir, sendo que nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3 aparecem respectivamente o diagrama unifilar da Rede Didática e os arranjos das duas subestações que dela fazem parte.

Sistema de Oito Barras extraído do Sistema Elétrico da ISA (Colômbia)

O Sistema de Oito Barras tem como objetivo, reunir numa rede, todos os tipos de arranjos de Subestações utilizados no Sistema de Potência Interligado da Colômbia e possui 6 Subestações, 8 elementos no Subconjunto Nível de Tensão, 9 Linhas, 3 Transformadores, 1 Reator, 4 Unidades de Geração, 4 Cargas, 146 Dispositivos Lógicos e 137 Nós.

Sistema Teste apresentado por Sullivan [4]

O Sistema Teste apresentado por Sullivan e outros [4], foi o Sistema utilizado por aqueles autores para testar o Configurador desenvolvido para a Brown Boveri da Suíça. Este sistema consta de: 4 Subestações, 4 elementos no Sub-conjunto Níveis de Tensão, 8 Linhas, 24 Dispositivos Lógicos e um número total de 24 Nós.

Sistema Teste apresentado por Bezerra [22]

O Sistema Teste apresentado por Bezerra e outros [22], foi o Sistema utilizado para testar o Configurador por eles desenvolvido em PROLOG. Sobre este Sistema fizeram-se 2 testes. O primeiro com todos os dispositivos lógicos fechados. No segundo abriram-se 6 dispositivos lógicos dividindo assim a rede em duas

áreas. Este Sistema consiste de 5 Subestações, 5 elementos no Sub-conjunto Nível de Tensão, 10 Linhas, 1 Unidade de Geração, 2 Cargas, 32 Dispositivos Lógicos e 32 Nós.

Sistema de Referência IEEE 14 Barras

O Sistema IEEE 14 Barras é apresentado como arranjos de Subestações do tipo utilizados por Bezerra [22] e Sullivan [4]. Sobre esta rede fizeram-se igualmente 2 testes. O primeiro com todos os dispositivos lógicos fechados de forma a obter só uma área. No segundo abriram-se 6 dispositivos lógicos dividindo a rede em duas áreas. Este Sistema tem: 14 Subestações, 14 elementos no Sub-conjunto Nível de Tensão, 20 Linhas, 4 Unidades de Geração, 9 Cargas, 69 Dispositivos Lógicos e um total de 79 Nós.

Sistema Sul do Brasil

O Sistema Sul do Brasil 500/230 KV apresenta um total de 21 Subestações, 24 elementos no Sub-conjunto Nível de Tensão, 35 Linhas, 4 Transformadores, 14 Unidades de Geração, 41 cargas, 9 Reatores, 708 Dispositivos lógicos e 585 nós. Os dados foram gentilmente cedidos pela ELETROSUL.

Passa-se a seguir à descrição completa do Sistema construído para efeito didático.

6.3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXEMPLO DIDÁTICO

Através deste Exemplo, se procura apresentar em detalhe os diagramas unifilares, incluindo os das Subestações, ilustrando também os dados de entrada e saída dos Configuradores. Um objetivo desta apresentação de dados é permitir que o leitor perceba o grande número de dados que são gerados sob o ponto de vista

de topologia.

6.3.1. Programa Unifilar para o Sistema Exemplo Didático.

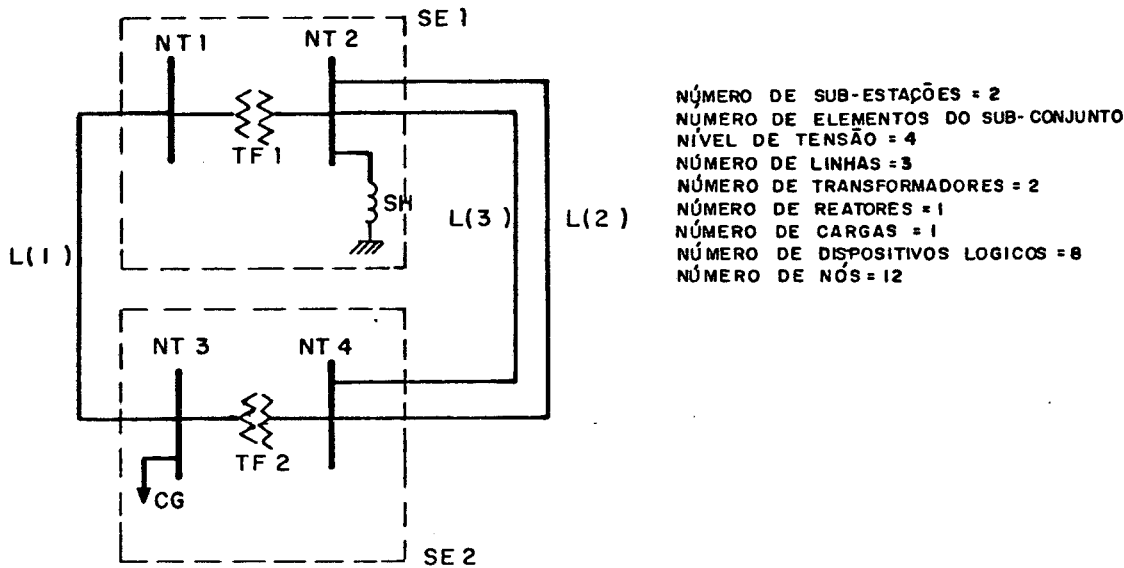


Figura 6.1 - Diagrama Unifilar do Modelo Didático.

6.3.2. Diagrama dos Arranjos das Subestações do Sistema Exemplo Didático

a) Subestação SE1

Esta Subestação é composta de Dois Níveis de Tensão apresentados como segue:

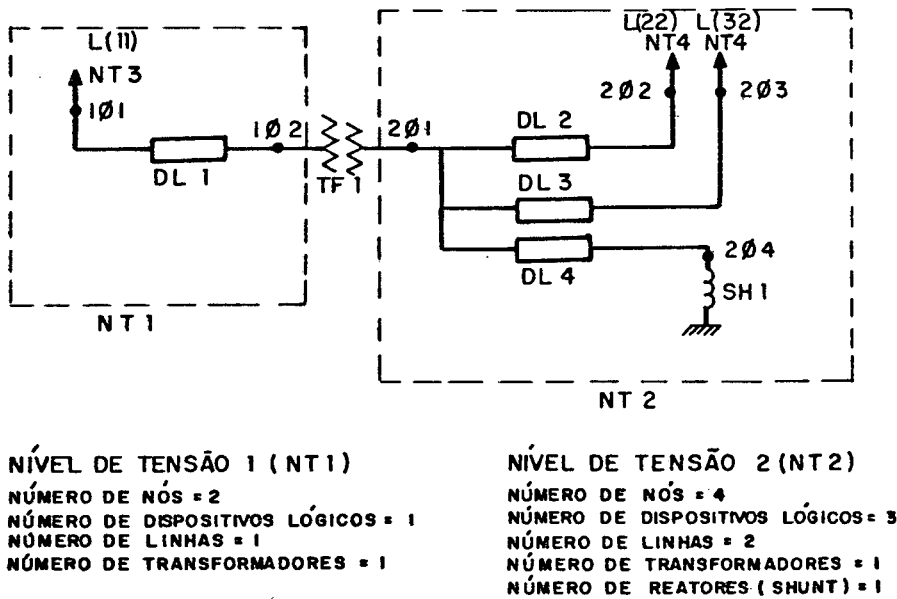
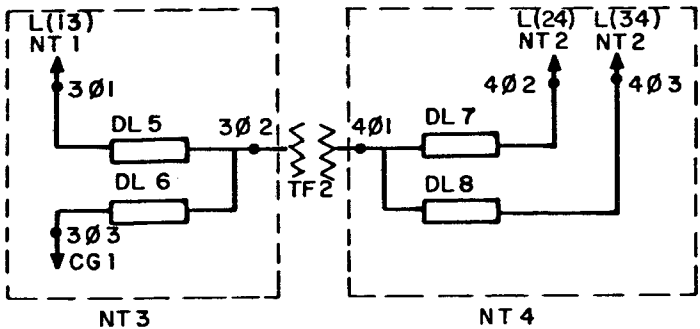


Figura 6.2 - Diagrama Unifilar da Subestação SE1 do Sistema Exemplo Didático.

b) Subestação SE2

A Subestação SE2 é composta pelos Dois Níveis de Tensão seguintes:



NÍVEL DE TENSÃO 3 (NT3)
NÚMERO DE NÓS = 3
NÚMERO DE DISPOSITIVOS LÓGICOS = 2
NÚMERO DE LINHAS = 1
NÚMERO DE TRANSFORMADORES = 1
NÚMERO DE CARGAS = 1

NÍVEL DE TENSÃO 4 (NT4)
NÚMERO DE NÓS = 3
NÚMERO DE DISPOSITIVOS LÓGICOS = 2
NÚMERO DE LINHAS = 2
NÚMERO DE TRANSFORMADORES = 1

Figura 6.3 - Diagrama Unifilar da Subestação SE2 do Sistema Exemplo Didático.

6.3.3. Representação no Computador do Sistema Exemplo Didático

A representação simplificada dos arquivos de subestações é apresentada no Apêndice B, já que serve como entrada no programa de Carga da Base de Dados Estática. A seguir é apresentada a Representação do Grafo feita pelo programa do Apêndice B, e que serve como entrada aos Configuradores de Subestações.

As variáveis abaixo utilizadas foram previamente definidas no Capítulo V.

- Subconjunto Subestação

	SE1	SE2
ISENTP	0	2
		4

- Subconjunto Nível de Tensão

	NT1	NT2	NT3	NT4	
NTNDP	0	2	6	9	12
NTDLP	0	1	4	6	8

I12XL	I12XTF	I12XCG	I12XUG	I12XSH	I2XLN	I2XTF	I2XCG	I2XUG	I2XSH
1	7	0	0	0	1	1	0	0	0
2	8	0	0	11	2	1	0	0	1
4	9	12	0	0	1	1	1	0	0
5	10	0	0	0	2	1	0	0	0

- Sub-Conjunto Nô

Nô	101	102	201	202	203	204	301	302	303	401	402	403
JDLND	1	1	3	1	1	1	1	2	1	2	1	1
IESQND	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
ISHNDN	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
NDDLDP	0	1	2	5	6	7	8	9	11	12	14	15 16

- Sub-Conjunto Equipamentos do Sistema

Nome do Equipamento	L(1)	L(2)	L(3)	L(1)	L(2)	L(3)	T(1)	T(1)	T(2)	T(2)	SH1	CG1
NDPXEQ	1	4	5	7	11	12	2	3	8	10	6	9
NDRMEQ	7	11	12	1	4	5	3	2	10	8	0	0

- Sub-Conjunto Dispositivo Lógico

Nome do Dispositivo	DL1	DL2	DL3	DL4	DL5	DL6	DL7	DL8
NDPXDL	1	3	3	6	7	8	10	10
NDRMDL	2	4	5	3	8	9	11	12

- Sub-Conjunto Dispositivo Lógico a Dois Elementos e Agrupados por Nó

JDLXX 1 1 2 3 4 2 3 4 5 5 6 6 7 8 7 8

Esta tabela, como foi visto no capítulo anterior, é requerida só para os Algoritmos que utilizam a técnica de visita aos vértices.

6.4 - DADOS DE SAÍDA DOS CONFIGURADORES PARA O SISTEMA EXEMPLO DIDÁTICO

São abaixo apresentados os Resultados do Configurador para o Sistema Exemplo Didático tendo em conta que os Dispositivos Lógicos DL3 e DL8 estão abertos.

6.4.1. Resultados do Configurador de Subestações

a) Resultados Matemáticos

- Sub-conjunto Barra

	IBRNTP	IQBR	NTBR	I12X
NT1	0	1	1	1
NT2	5	1	2	2
NT3	0	1	3	4
NT4	6	1	4	5
5	0	0	2	3
6	0	0	4	6
7	8	0	0	0
8	9	0	0	0

Além destes resultados, para o Algoritmo de visita aos vértices se deve produzir o Conjunto de Barras adjacentes (vértices) a cada Barra.

- Sub-conjunto Nô

Nome do Nô	101	102	201	202	203	204	301	302	303	401	402	403
NDBRI	1	1	2	2	-5	2	3	3	3	4	4	-6

(Os números negativos correspondm a Barras Isoladas).

- Sub-conjunto Equipamentos do Sistema

Nome do Equip.	L(1)	L(2)	L(3)	L(1)	L(2)	L(3)	T(1)	T(1)	T(2)	T(2)	SH1	CG1
I2XBR	7	8	0	9	10	0	0	11	12	0	0	0

b) Representação Sagital - Diagrama Unifilar

Subestação SE1

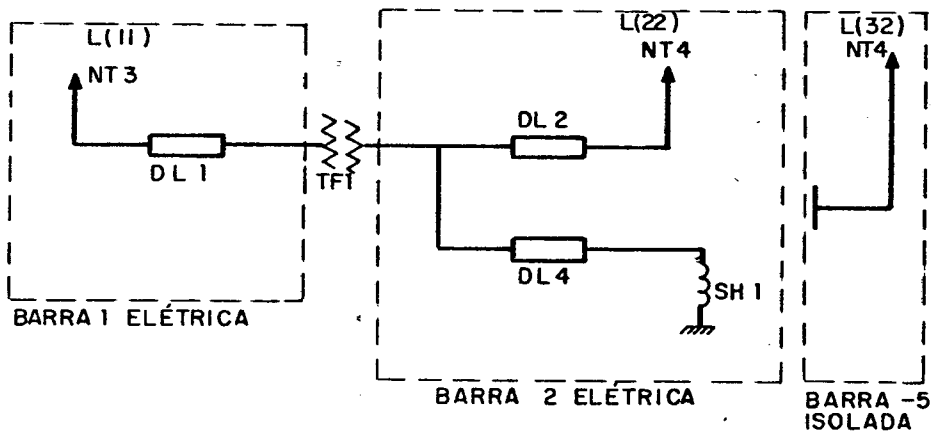


Figura 6.4 - Resultado do Processamento da Subestação SE1.

Subestação SE2

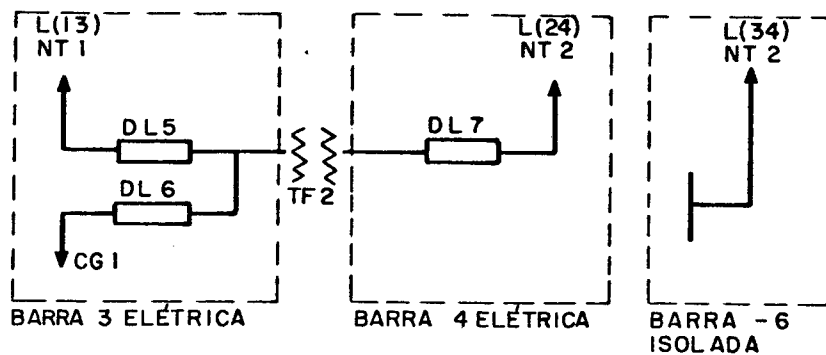


Figura 6.5 - Resultado do Processamento para a SE₂

6.4.2 - Resultados do Configurador da Rede

a) Resultado Matemático

Sub-conjunto Barra

IARBR	1	1	1	1	0	0
IBRARP	3	0	4	2	0	0

Sub-conjunto Área

ILBRAR	1	0	0
IBRARN	4	0	0

Número de Áreas NAR=1

b) Representação Sagital - Diagrama Unifilar da Rede

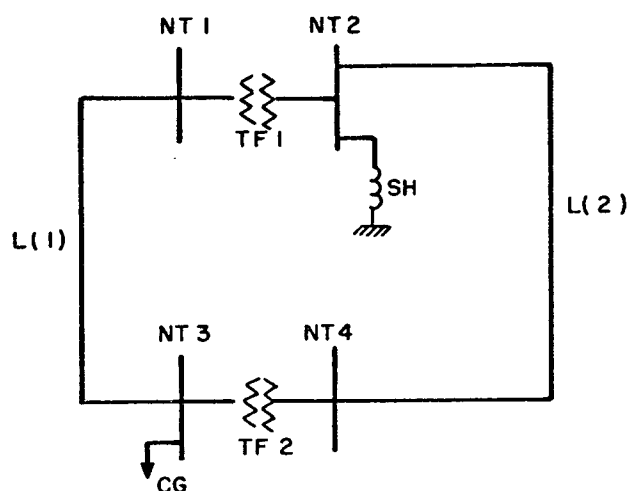


Figura 6.6 - Resultado da Configuração para o Sistema Exemplo Didático.

6.4.3. Resultado à Saída do Programa Configurador de Rede. Sistema Exemplo Didático.

*NÚMERO DE ÁREAS = 1

ÁREA NÚMERO 1

BARRA	1	NOME	NT1	ELETRICA
NOS	1	2		
EQUIPAMENTOS CONECTADOS A BARRA				

L11

TF1

BARRA	3	NOME	NT3	ELETRICA
-------	---	------	-----	----------

NOS	1	2	3
-----	---	---	---

EQUIPAMENTOS CONECTADOS A BARRA

L13

LF2

CG1

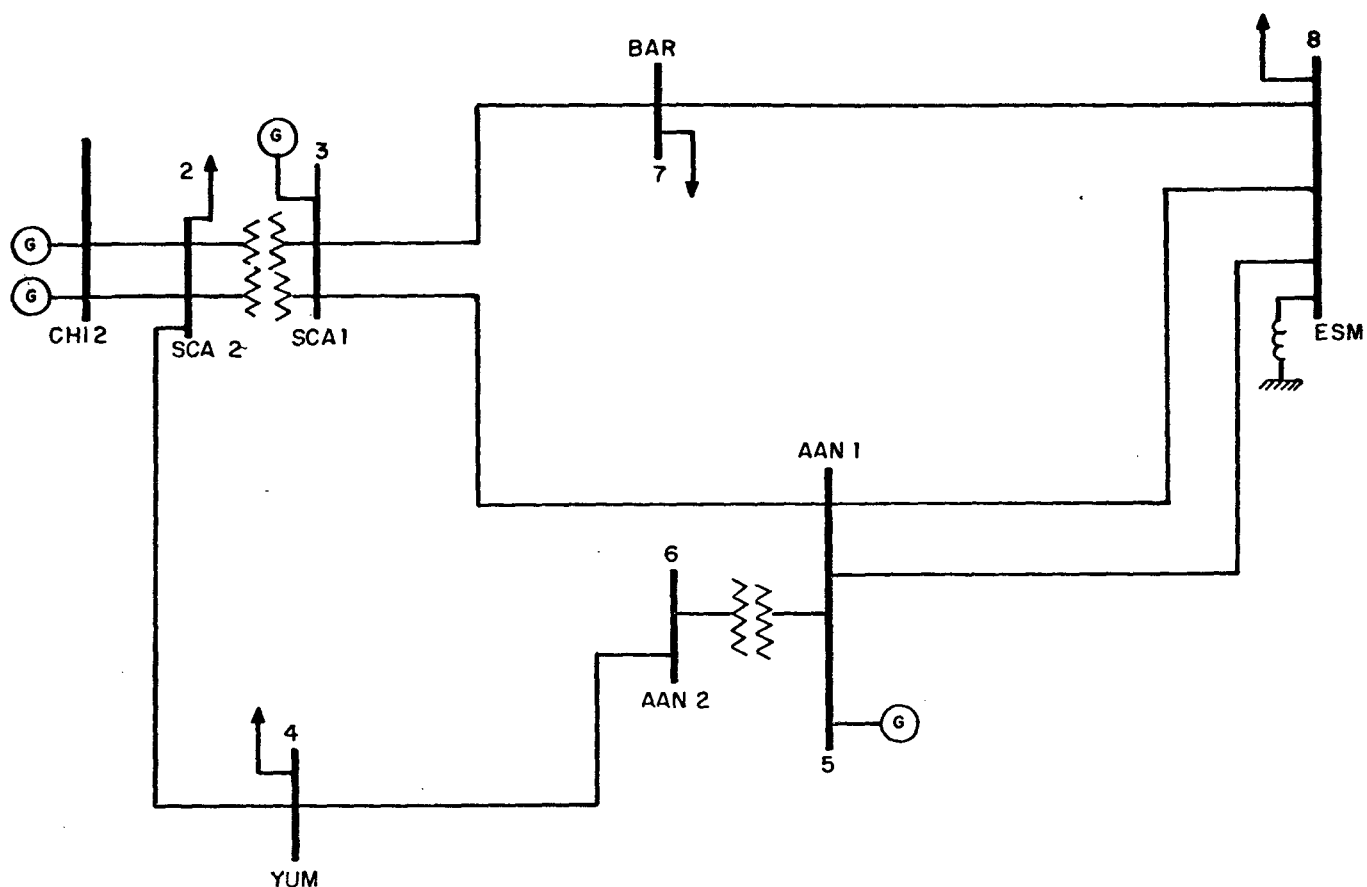
BARRA	2	NOME	NT2	ELETRICA
NOS	1	2	4	
EQUIPAMENTOS CONECTADOS A BARRA				
L22				
TF1				
SH1				
BARRA	4	NOME	NT4	ELETRICA
NOS	1	2		
EQUIPAMENTOS CONECTADOS A BARRA				
L24				
TF2				

Para o operador, entretanto, estes resultados são apresentados através da Interface Homem-Máquina, em telas de monitores, em geral a cores, onde são sobrepostos os dados de saída dos configuradores sobre diagramas unifilares detalhados das Subestações e da Rede.

6.5. - Diagramas Unifilares

A seguir se apresentam os Diagramas Unifilares Completos dos Sistemas Teste apresentados por Sullivan e outros [4] , Bezerra e Outros [22] e os Diagramas unifilares das redes de Oito Barras e Quatorze Barras da IEEE.

6.5.1. Diagrama Unifilar do Sistema de oito Barras extraído do Sistema Elétrico da Colômbia.



NÚMERO DE SUB ESTAÇÕES = 6	NÚMERO DE UNIDADES DE GERAÇÃO = 4
NÚMERO DE ELEMENTOS DO SUB-CONJUNTO	NÚMERO DE CARGAS = 4
NÍVEL DE TENSÃO = 8	NÚMERO DE NÓS = 137
NÚMERO DE LINHAS = 9	NÚMERO DE DISPOSITIVOS LÓGICOS = 146
NÚMERO DE TRANSFORMADORES = 3	
NÚMERO DE REATORES = 1	

CONVENÇÕES

(G) UNIDADE DE GERAÇÃO
 ↑ CARGA
 E REATOR
 TRANSFORMADOR

Figura 6.7 - Sistema de oito Barras extraído do Sistema Elétrico de Colômbia.

6.5.2 - Sistema teste utilizado por Sullivan e outros [4]

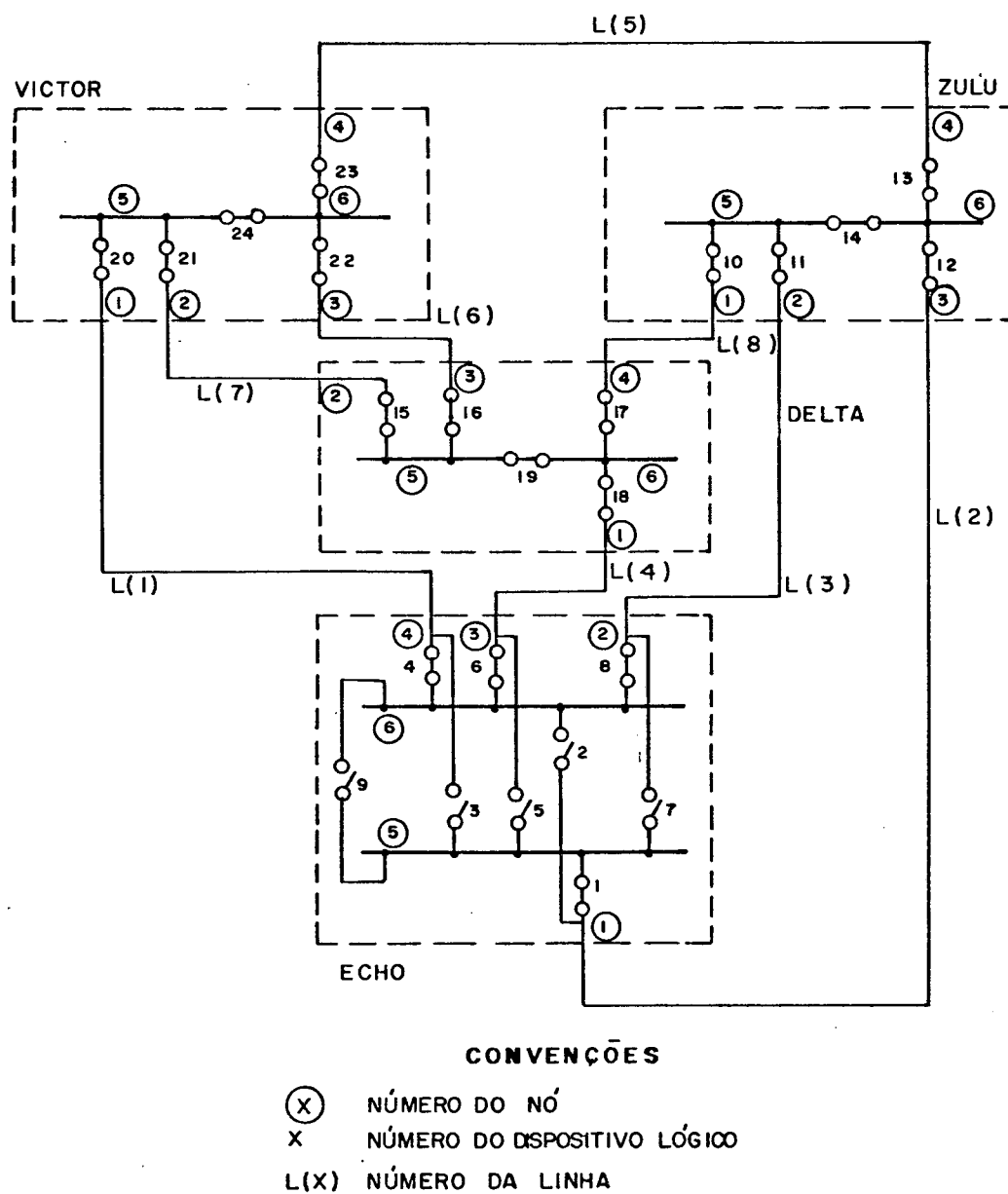
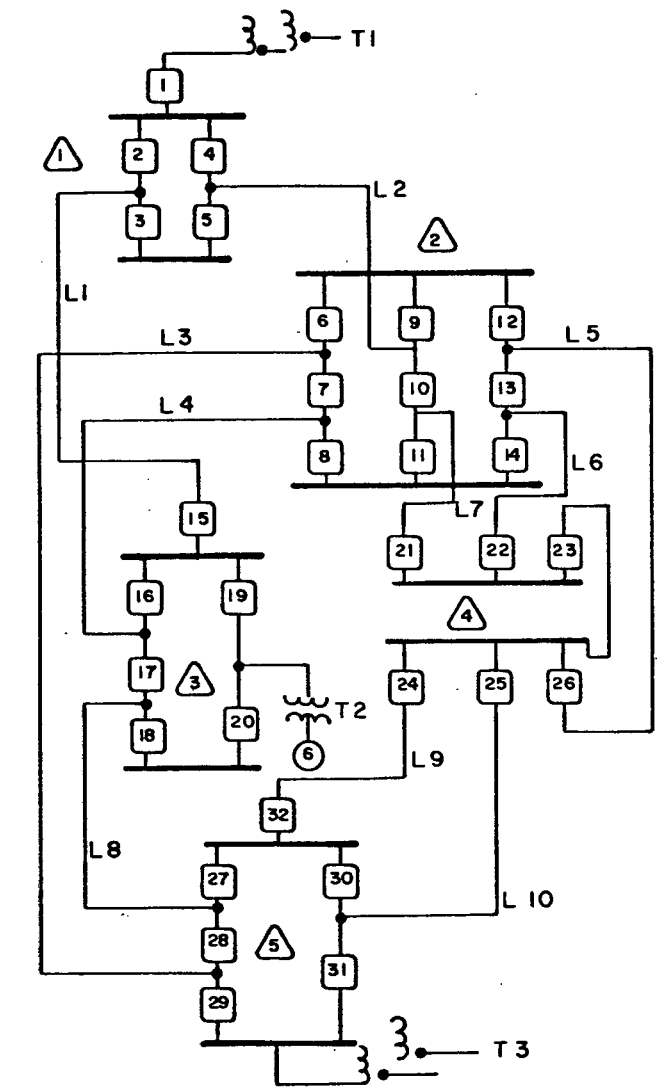


Figura 6.8 - Diagrama Unifilar do Sistema teste utilizado por Sullivan e outros.

6.5.3. Sistema teste utilizado por Bezerra e outros [22]

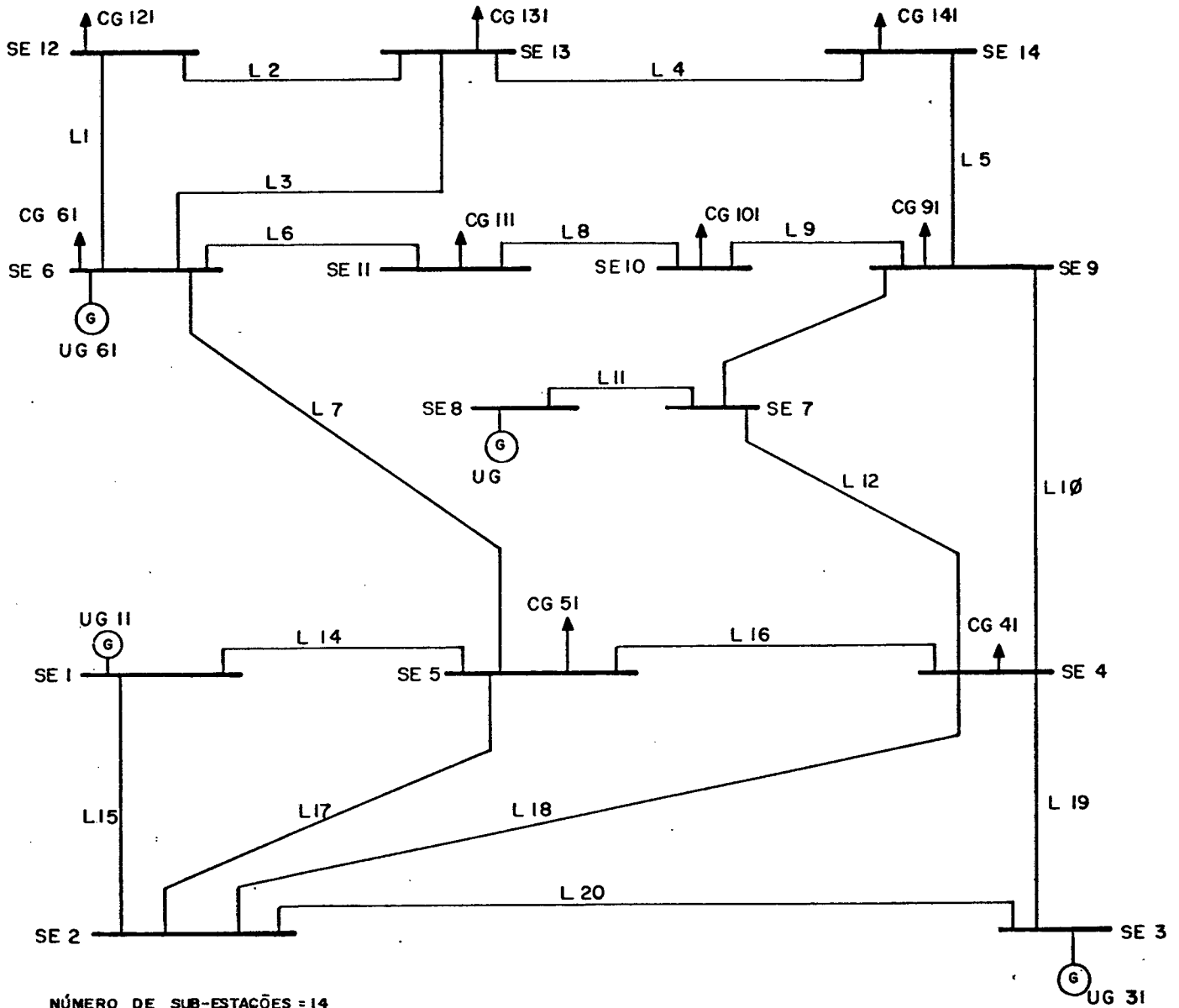


CONVENÇÕES

- △ - NÚMERO DA SUBSTACÃO
- - NÚMERO DO DISPOSITIVO LÓGICO
- ⊙ - GERADOR
- T - TRANSFORMADOR
- L - LINHA

Figura 6.9 - Diagrama Unifilar do Sistema teste utilizado por Bezerra e outros.

6.5.4 - Sistema de referência IEEE 14 Barras.



NÚMERO DE SUB-ESTAÇÕES = 14
 NÚMERO DE ELEMENTOS DO
 SUB-CONJUNTO NÍVEIS DE TENSÃO = 14
 NÚMERO DE LINHAS = 20
 NÚMERO DE TRANSFORMADORES = 0
 NÚMERO DE REATORES = 0

NÚMERO DE U. GERAÇÃO = 4
 NÚMERO DE CARGAS = 9
 NÚMERO DE NÓS = 79
 NÚMERO DE DISPOSITIVOS LÓGICOS = 69

Figura 6.10 - Diagrama Unifilar do Sistema de Referência
 IEEE 14 Barras.

6.6. Tempos de Respostas dos Testes para cada um dos Programas Implementados

As seguintes são as denominações que se dão às Redes utilizadas para testar os programas:

- Rede (a) Sistema Exemplo Didático
- Rede (b) Sistema de oito Barras em operação normal, ou seja, todas as Subestações operando em Barra Principal e nenhuma linha operando em By-pass. Para conseguir a operação normal foi necessário abrir 19 Dispositivos Lógicos.
- Rede (c) Sistema Teste de Sullivan com todos os Dispositivos Lógicos Fechados.
- Rede (d) Sistema Teste de Bezerra com todos os Dispositivos Lógicos Fechados.
- Rede (e) Sistema Teste de Bezerra dividido em duas Áreas. Abertos os Dispositivos Lógicos DL6, DL7, DL8, DL15, DL23 e DL26.
- Rede (f) Sistema IEEE de 14 Barras com todos os Dispositivos Lógicos Fechados.
- Rede (g) Sistema IEEE de 14 Barras dividido em duas Áreas. Abertos 6 Dispositivos Lógicos.
- Rede (h) Sistema 500/230 KV do Sul do Brasil em operação normal. Com 242 Dispositivos Lógicos Abertos.

Na Tabela 6.1 se apresentam as relações de tamanho das redes envolvidas. A relação foi feita tomando como base o número

de dispositivos lógicos de cada rede. Por exemplo a Rede Sul do Brasil com 708 Dispositivos Lógicos é 88,5 vezes a rede exemplo didática que tem apenas 8 Dispositivos Lógicos.

<div><div>Y</div><div>X</div></div>	DIDÁTICO DL = 8	OITO BARRAS DL = 146	SULLIVAN DL = 24	BEZERRA DL = 32	IEEE - 14 DL = 69	SUL DO BRASIL DL = 708
SISTEMA EXEMPLO DIDÁTICO (a)	1	18.25	3	4	8.625	88.5
SISTEMA OITO BARRAS (b)	0.05	1	0.16	0.22	0.47	4.84
SISTEMA TESTE SULLIVAN [4] (c)	0.3	6.08	1	1.33	2.875	29.5
SISTEMA TESTE BEZERRA [22] (d)	0.25	4.56	0.75	1	2.15	22.13
SISTEMA IEEE 14 BARRAS (f)	0.11	2.11	0.35	0.46	1	10.26
SISTEMA 500/230kv DO SUL DO BRASIL (h)	0.011	0.20	0.034	0.045	0.097	1

Tabela 6.1 - Relação de Dimensões das Redes envolvidas
(Relação = $\frac{X}{Y}$) .

A Base é o número de Dispositivos Lógicos.

As Tabelas 6.2 e 6.4 mostram os tempos de Respostas dos Configuradores de Subestações e Rede em Modo Inicialização para as Redes envolvidas.

A Tabela 6.4 apresenta os tempos de Respostas dos Configuradores de Subestações em Modo Atualização para a Subestação Salto Osório (66 Dispositivos Lógicos e 47 Nós).

A tomada de tempo foi feita com a Rotina Utilitária do IBM-4341 e corresponde ao menor tempo obtido depois de uma série de 10 testes. O fato dos resultados serem todos múltiplos de 3.3 se deve a que a rotina de tempo do IBM 4341 trabalha com

tempo de discretização mínimo de 1/300 de segundo que corresponde a 3.3 milésimos de segundo. Isto levou às Tabelas 6.3 e 6.5, que correspondem às Tabelas 6.2 e 6.4 divididos pelo tempo padrão de 3.3ms.

6.6.1. Tempos Totais de Resposta dos Configuradores de Subestações em Milésimos de Segundo (Modo Inicialização)
(Tempo de Cálculo para Configurar todas as SE).

	SISTEMA EXEMPLO DIDÁTICO	SISTEMA OITO BARRAS ISA	SISTEMA TESTE SULLIVAN	SISTEMA TESTE BEZERRA	SISTEMA TESTE BEZE RRA(2 ÁREAS)	SISTEMA IEEE-14 BARRAS	SISTEMA IEEE-14 (2 ÁREAS)	SISTEMA SUL DO BRASIL(h)
ALGORÍTMO BASEADO NA ÁRVORE GERADORA	3,3	6,6	3,3	3,3	3,3	6,6	6,6	33,3
ALGORÍTMO BASEADO NA CONTR. DE VÉRTICES	3,3	9,9	3,3	3,3	3,3	6,6	6,6	39,9
ALGORÍTMO BASEADO NA VISITA AOS VÉRTICES	3,3	13,3	3,3	3,3	6,6	6,6	9,9	109,9

Tabela 6.2 - Tempos de Cálculos dos Configuradores de Subestações em Modo de Inicialização.

A Tabela 6.3 mostra os tempos obtidos em múltiplos de 3.3ms. (tempo base do IBM 4341).

	SISTEMA EXEMPLO DIDÁTICO	SISTEMA OITO BARRAS ISA	SISTEMA TESTE SULLIVAN	SISTEMA TESTE BEZERRA	SISTEMA TESTE BEZE- RRA(2 AREAS)	SISTEMA IEEE - 14 BARRAS	SISTEMA IEEE-14 (2 AREAS)	SISTEMA SUL DO BRASIL (h)
ALGORÍTMO BASEADO NA ÁRVORE GERADORA	1	2	1	1	1	2	2	10
ALGORÍTMO BASEADO NA CONTR. DE VÉRTICES	1	3	1	1	1	2	2	12
ALGORÍTMO BASEADO NA VISITA AOS VÉRTICES	1	4	1	1	2	2	3	33

Tabela 6.3 - Tempos de Cálculo Padronizado dos Configuradores de Subestações em Modo Inicialização.

A Figura 6.11 na página seguinte, mostra as Curvas de Comparação de Tempos dos Configuradores de Subestações para as Redes (e), (g), (b) e (h) que são as redes onde realmente se apresentaram as principais diferenças.

6.6.2. Tempos de Resposta dos Configuradores da Rede em Milésimos de Segundo

	SISTEMA EXEMPLO DIDÁTICO	SISTEMA OITO BARRAS ISA	SISTEMA TESTE SULLIVAN	SISTEMA TESTE BEZERRA	SISTEMA TESTE BEZE- RRA(2 AREAS)	SISTEMA IEEE - 14 BARRAS	SISTEMA IEEE-14 (2 AREAS)	SISTEMA SUL DO BRASIL (h)
ALGORÍTMO BASEADO NA ÁRVORE GERADORA	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	6,6
ALGORÍTMO BASEADO NA CONTR. DE VERTICES	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	6,6	6,6	13,3
ALGORÍTMO BASEADO NA VISITA AOS VÉRTICES	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	6,6

Tabela 6.4 - Tempos de Cálculo dos Configuradores de Rede.

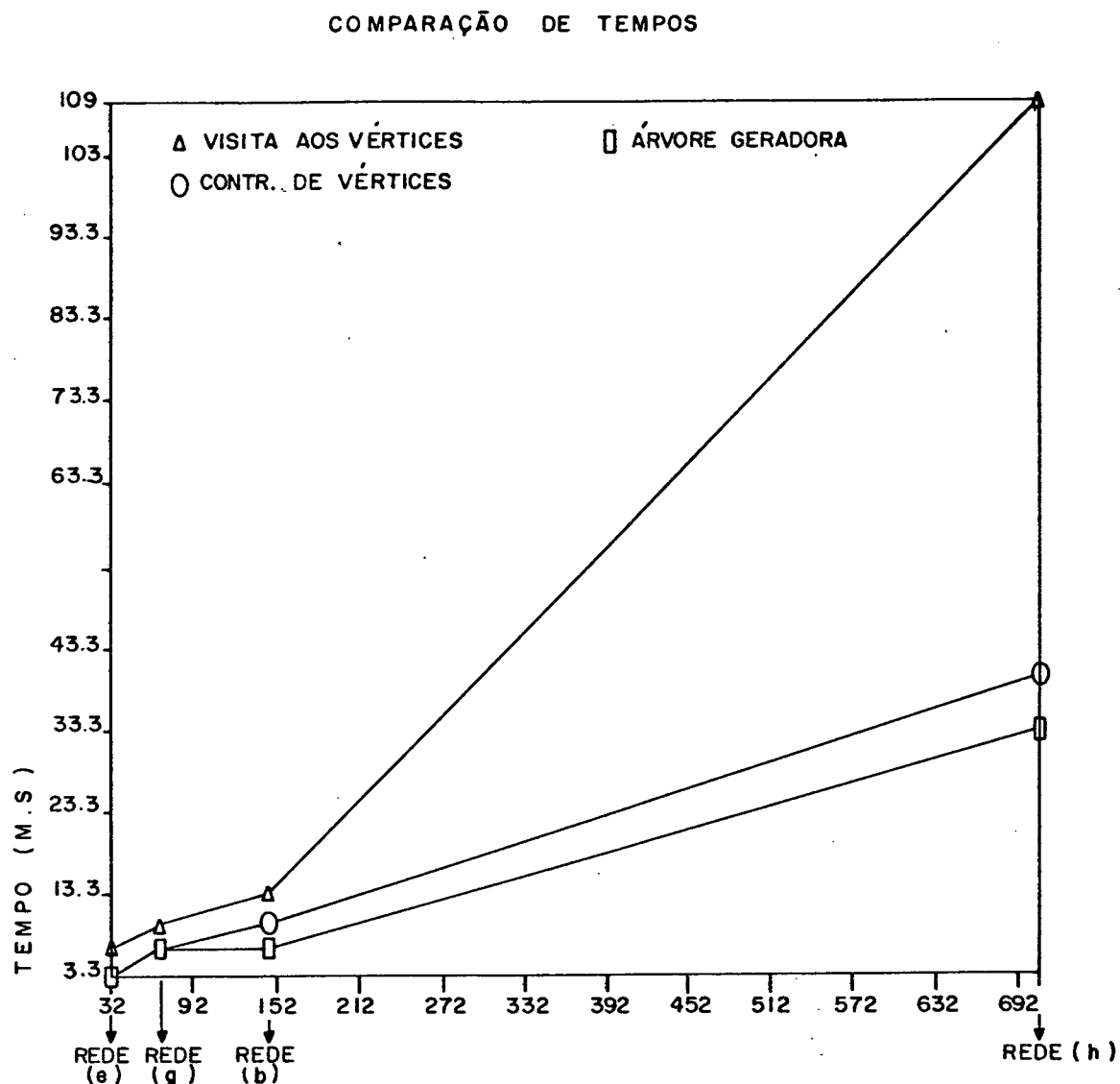


Figura 6.11 - Curvas de Comparação de Tempos dos Configuradores de Subestações desenvolvidos (Modo Inicialização).

A Tabela 6.5 a seguir mostra os tempos padronizados dos Configuradores de Rede.

	SISTEMA EXEMPLO DIDÁTICO	SISTEMA OITO BARRAS ISA	SISTEMA TESTE SULLIVAN	SISTEMA TESTE BEZERRA	SISTEMA TESTE BEZE RRA(2 AREAS)	SISTEMA IEEE-14 BARRAS	SISTEMA IEEE-14 (2 AREAS)	SISTEMA SUL DO BRASIL(h)
ALGORÍTMO BASEADO NA ÁRVORE GERADORA	1	1	1	1	1	1	1	2
ALGORÍTMO BASEADO NA CONTR. DE VÉRTICES	1	1	1	1	1	2	2	4
ALGORÍTMO BASEADO NA VISITA AOS VÉRTICES	1	1	1	1	1	1	1	2

Tabela 6.5 - Tempos de Cálculo Padronizado dos Configuradores de Rede.

6.6.3 - Tempos dos Configuradores de Subestações para a Subestação Salto Osório em milésimos de segundo

	TEMPO	TEMPO/3.33
ALGORÍTMO BASEADO NA ÁRVORE GERADORA	3,33	1
ALGORÍTMO BASEADO NA CONTR. DE VÉRTICES	3,33	1
ALGORÍTMO BASEADO NA VISITA AOS VÉRTICES	16,66 + 9,9	5 + 3

Tabela 6.6 - Tempos de Configuração da Subestação Salto Osório.

NOTA: Os 9.9 milésimos de segundo que se somam ao Algoritmo baseado na visita aos vértices corresponde ao tempo necessário para elaborar de novo toda a lista de adjacências de barras.

6.6.4. Configuradores funcionando no Modo Atualização

No Modo Atualização os Configuradores partem da Rede já configurada e, tendo detectado alguma mudança de topologia, verificada por uma mudança no estado de algum dos seus dispositivos lógicos, refazem a topologia somente para as Subestações, onde houve alguma mudança.

Assim, nesse modo de atuação, os tempos totais são grandemente reduzidos, principalmente para sistemas reais de grande porte, onde as subestações com mudanças se restringem a umas poucas, com a maioria da configuração permanecendo inalterada.

No caso do Sistema Sul 500 KV/230 KV, supondo que somente a SE de Salto Osório sofreu mudança se teria os seguintes resultados para a configuração global em modo atualização:

ALGORÍTMO	SE S. OSÓRIO		REDE GLOBAL		TOTAL	
ÁRVORE GERADORA	3,33	1	6,66	2	9,99	3
CONTR. DE VÉRTICES	3,33	1	13,33	4	16,66	5
VISITA AOS VÉRTICES	26,56	8	6,66	2	33,22	10

Tabela 6.7 - Tempo total de Configuração. Modo Atualização.
Reconfiguração da Subestação Salto Osório.

Note-se que há, portanto, uma drástica redução de tempo de Configuração em Modo Atualização. Considerando que este tipo de atuação é o mais freqüente, pode-se esperar grandes economias

computacionais.

6.7 - Discussão dos Resultados

Oito redes foram testadas, sendo que dentre estas as redes (b) e (h) correspondem a sistemas com subestações reais. A rede (b) contém subestações típicas utilizadas na rede interligada Colombiana e a rede (h) foi extraída do Sistema Sul da rede 500/230 KV do Sul do Brasil. Das outras redes, uma foi construída com fins didáticos e as demais foram extraídas da literatura.

A Tabela 6.1 mostra como as redes reais se apresentam muito maiores, no que se refere a topologia, que as redes testes sugeridas na literatura. Por exemplo a rede do Sul do Brasil é 29.5 vezes a rede apresentada por Sullivan e 22.13 vezes a rede sugerida por Bezerra. Além do que as redes reais apresentam uma média de 20 Dispositivos Lógicos por Nível de Tensão e nas redes apresentadas por Sullivan e Bezerra a maior Subestação apresenta 9 Dispositivos Lógicos.

Todos os Configuradores baseados nos Algoritmos eleitos no Capítulo IV, felizmente apresentaram um comportamento de tempo de resposta satisfatório e todos eles ficaram em torno dos milésimos de segundo, tanto para Modo Inicialização quanto para Modo Atualização. Ou seja, a razão principal de obter Configuradores rápidos foi alcançada.

A rotina de tempo do IBM 4341 trabalha com tempo mínimo de 1/300 de segundo, que corresponde exatamente com 3.333 milésimos de segundo, por isto se decidiu fazer as tabelas 6.3 e 6.5 onde se mostram os tempos de cálculo em múltiplos de 3.333 milési

mas de segundo.

Da Figura 6.11, se vê claramente o comportamento do tempo de resposta de cada Configurador de Subestações dependendo do tamanho da rede sobre a qual está trabalhando. O mais rápido dentre estes sendo o que utiliza o Algoritmo da Árvore Geradora. O programa baseado no Algoritmo da Contração de Vértices fica em segundo lugar e por último o Algoritmo de Visita aos Vértices, conhecido como o Configurador da AEP.

Para as redes (a), (c), (d) e (g) não se apresentaram diferenças entre os três programas devido às seguintes razões:

- 1º) Redes pequenas. A rotina de tempo do IBM-4341 não atingiu a primeira fração de discretização do medidor de tempo de CPU (1/300 de segundo).
- 2º) Todos os Dispositivos Lógicos destas redes estão fechados, o que fez com que o Configurador de Visita aos Vértices utilizasse só a Rotina "Nível de Tensão com todos os Dispositivos Lógicos Fechados", com um correspondente ganho de tempo.

As duas situações acima são difíceis de encontrar no dia-a-dia dos Sistemas de Potência reais.

Na Tabela 6.5, onde se apresentam os tempos dos Configuradores de Rede, nota-se que o Algoritmo de Contração de Vértices Adjacentes, para as redes IEEE-14 Barras e para a rede Sul do Brasil, trabalha o dobro que os demais configuradores. Isto se deve ao mesmo problema do medidor de tempo de CPU do IBM, bem como ao fato de que a representação de G por meio de listas não é a mais conveniente para tal algoritmo, necessitando-se realizar,

dentro do processo, uma transformação adicional deste tipo representação para a forma matricial (no caso armazenada de modo a explorar a esparsidade da matriz de adjacências). A dinâmica das mudanças de topologia em tempo real exige a constante atualização desta matriz. Caso tivesse conseguido uma maneira de atualizar mais rapidamente esta matriz, com os dados armazenados de modo mais conveniente, certamente este algoritmo seria competitivo.

O teste feito sobre a Subestação de Salto Osório procura mostrar que a relação do tempo de resposta é de 3 a 5 vezes menor no caso do Algoritmo de Passeio pelos Arcos (Árvore Geradora) quando comparado com o tempo de processamento do Algoritmo de Procura de Caminhos por meio da Visita aos Vértices.

O Configurador de Subestações ou de rede baseado no Algoritmo de Visita aos Vértices, precisa de um maior esforço computacional, tanto para produzir os dados de entrada como para os dados de saída. Por exemplo, para o configurador de subestações requer como dados de entrada as tabelas JDLND (Número de Dispositivos Lógicos do NÓ) e JDLXX (Dispositivos Lógicos por NÓ), apresentadas no item 6.3.3, e, como dados de saída, deve entregar o conjunto de barras vizinhas de cada barra e o número de barras vizinhas das mesmas, o que materializa este trabalho suplementar, com a nota da repercussão no tempo de cálculo.

6.8. CONCLUSÕES DESTES CAPÍTULO

Neste Capítulo foi mostrada inicialmente, através de um exemplo de uma rede didática, a organização dos dados de entrada e de saída dos Configuradores implementados.

Os tempos de Resposta para o configurador de Subestações

foram separados para o Modo de Inicialização e para o Modo de Atualização. Dos resultados se constata que o programa que trabalha mais rápido é aquele baseado no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora, seguido daquele que usa a técnica de contração de Vértices Adjacentes e, depois o Algoritmo que trabalha por meio da Visita aos Vértices.

Pode-se constatar, igualmente, que o Algoritmo de contração dos Vértices pode ser que este seja o mais rápido dentre todos os Configuradores examinados, mas para tanto se deve encontrar uma forma de atualizar a Matriz de Adjacências de modo mais direto e em tempos mais competitivos.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1. CONCLUSÕES FINAIS

As conclusões finais às que se chegaram neste trabalho foram:

- 1º) O Configurador que apresenta melhor desempenho em termos de tempo computacional e de armazenamento é aquele baseado no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora.
- 2º) A implementação do Modo Atualização para os Configuradores desenvolvidos mostra ainda como mais vantajoso o Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora. Entretanto, neste modo de atuação, que é o mais comum em Tempo Real, os tempos de cálculo dos configuradores estudados se aproximam, sendo esta provavelmente, uma das razões para a falta de interesse demonstrada na literatura, pelo estudo deste problema.
- 3º) Os Configuradores baseados no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora e no Algoritmo da Contração de Vértices Adjacentes são, até onde se sabe, apresentados pela primeira vez formalmente para tratar da obtenção da configuração da rede dos Sistemas de Potência.

- 49) Os Configuradores foram testados também com dados de Sistemas reais, tais como os da Colômbia e do Sul do Brasil e, portanto, estão habilitados para tratar com Sistemas reais de grande porte.
- 59) O "Algoritmo Padrão da Técnica de Visita aos Vértices", se apresenta mais lento devido à redundância de buscas ao longo do processo, pois a técnica utilizada faz com que se tenha que visitar cada vértice tantas vezes quanto for o número de adjacências do mesmo.
- 69) A razão do Algoritmo de Contração de Vértices Adjacentes ser mais lento que o Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora, é a atualização da estrutura esparsa da Matriz de Adjacências que deve ser feita cada vez que é requerido.
- 79) O requisito maior de memória do Configurador de Subestações baseado na Técnica de Visita aos Vértices, está no fato de precisar de uma lista adicional de arcos (a dois elementos) de forma que sejam agrupados por vértice. Uma outra lista adicional requerida por este Configurador é a de Vértices em Fila de Espera a serem visitados.
- 89) A implementação feita do Configurador baseado no Algoritmo da Obtenção da Árvore Geradora, melhorou substancialmente o Configurador baseado nesta mesma técnica e que foi implementado por Sullivan e outros [4] em 1976. O Configurador implementado por Sullivan tem que fazer mais de um passeio pelos arcos do Grafo e o Configurador implementado neste traba

lho só faz um passeio pelos arcos.

7.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

As sugestões para futuros trabalhos são:

- 1º) Implantar os Configuradores construídos em um Centro de Controle a fim de testar o desempenho dos mesmos em situações realistas, em tempo real.
- 2º) Estudar a forma de atualizar diretamente em tempo Real a Matriz de Adjacências, para verificar a possibilidade de tornar o Configurador baseado no Algoritmo de Contração de Vértices Adjacentes numa outra boa alternativa para resolver este problema.
- 3º) Estudar a descentralização do processo da topologia, visando aplicações de processamento distribuído.
- 4º) Estudar mais a fundo a configuração de subestações visando a aplicação de técnicas de sistemas especialistas de modo a realizar conjuntamente os testes de qualificação de topologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - T. E. DY LIACCO and T. J. KRAYNAK, "The Processing by Logic programming of Circuits Breakers and Protective Relaying Information". IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems. PAS-88. pp 171-175, 1969.
- 02 - A. M. SASSON, S. T. EHRMANN, P. LYNCH, L.S. VAN SLYCH, "Automatic Power System Network Topology Determination". IEEE Trans. PAS-92. pp 610-618, 1972.
- 03 - DEO, NARSINGH, "Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science", Prentice-Hall Series in Automatic Computation. Englewood Cliffs. N.J. 1974.
- 04 - A. C. SULLIVAN, K. REICHERT, and S. SALY, "An On-line Technique for Network Topology Determination for use in Security Assessment Studies". IEE International Conference Proceedings. pp 61-66. London, June, 1976.
- 05 - STEVE O, HANSON and ANJAN BOSE, "Input-Output processing of On-line Contingency Analysis". IEEE Power Industries Computer Applications Conference. pp 58-63. 1979.

- 06 - F. GODERYA, A. A. METWALLY, O. MANSOUR. "Fast Detection and Identification of Islands in Power Networks." IEEE Trans. PAS. pp 217-221. 1980.
- 07 - M. BERTRAN, X. CORBELLA. "On the Validation and Analysis of a New Method for Power Network Connectivity Determination." IEEE Trans. PAS. pp 316-324. 1982.
- 08 - ANJAN BOSE. "Modeling of External Networks for On-line Security Analysis." IEEE Trans. PAS VOL PAS-103. pp 2117-2123. 1984.
- 09 - PARRA ESTRELLA, FLOREZ LUCIO. "Una solución al Problema del Configurador basada en la Matriz de admitancia". Universidad Nacional de Colombia. 1984.
- 10 - MACHADO, L.J.B., Notas de Aula da disciplina Análise de Segurança. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1988.
- 11 - FURTADO, Antônio. "Teoria dos Grafos - Algoritmos". Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1973.
- 12 - BOAVENTURA, Paulo. "Teoria e Modelos de Grafos". Editora Edgard Blücher. São Paulo. 1979.

- 13 - KAUFMANN, A. "Introducción a la Combinatoria". Editorial Continental. Espanha. 1971.
- 14 - BERGE, Claude. "Graphs and Hypergraphs". 2 Ed rev. Amsterdam. North Holland. 1976.
- 15 - HARARY, Frank. "Graph Theory". Addison-Wesley Series in Mathematics. Massachusetts. 1972.
- 16 - GONDRAN, Michel. MINOUX, Michel. "Graphes et Algorithmes". Editions Eyrolles, Paris. 1985.
- 17 - HAGENGREN, Bo., SANDBERG, Ulf. "A Control Center Laboratory with a Realistic Power System Model". IEEE Transactions on Power Systems VOL PWRS-1. pp 292-297. 1986.
- 18 - HEIKKI, Kosonen. "Practical Experiences in the use of Advanced Network Applications at the Finnish National Control Centre". IEEE Transactions on Power Systems VOL PWRS-1 pp 298-301. 1986.
- 19 - McDYER, F. HERGER, K. "The new National Control Centre Ireland". IEEE Transactions on Power Systems VOL. PWRS-2. pp 85-91. 1987.
- 20 - SAKIS MELIOPOULUS, COKKINIDES, G., CONTAXIS, G. "Computer Aided Instruction of power System Security Control Functions". IEEE Transactions on Power Systems VOL. PWRS-2. pp 232-238. 1987.

- 21 - SHOULTS, R., CHEN, M.S., DOMIJAN, A. "The Energy System research Center Electric Power System Simulation Laboratory and Energy Management System Control Center". IEEE Transaction on Power Systems VOL PWRS-2. pp 239 - 246, 1987.
- 22 - BEZERRA, U. H, COROA, A. C, SAMPAIO, O. A. "Determinação em Tempo Real da Topologia da Rede Elétrica usando PROLOG." 7º CBA, VOL 2, São José dos Campos, SP, pp 980-985. 1988.
- 23 - BEN YAACOV, G. Z. "Data Base environment for Power System Simulation Models". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems VOL PAS-100. pp 2643-2649. 1981.
- 24 - INTERCONEXION ELECTRICA S.A. ISA. "Sistema de Manejo de Energia". Medellin. Colombia. 1987.
- 25 - BEHZAD. Chartrand, LESNIAK-FOSTER. "Graphs and Digraphs". Prindle-Weber and Scmidth Series. Boston. 1979.
- 26 - STAGG G.W., EL-ABIAD A. H. "Computer Methods in Power System Analysis". McGraw-Hill Inc. 1968.
- 27 - INTERCONEXION ELÉCTRICA S.A. ISA. "Especificaciones Funcionales del Programa Configurador de Subestaciones." Bogotá. 1980.

- 28 - IRVING M. R., STERLING M.J.H. "Substation data Validation".
IEE International Conference Proceedings. pp 119-122. Lon
don. 1982.
- 29 - DY LIACCO THOMAS E. "System Security: The Computer's
role". IEEE Spectrum pp 43-50. 1978.
- 30 - CEGRELL, Torsten. "Power System Control Technology".
Prentice-Hall. Cambridge. 1986.
- 31 - MONTICELLI, A; WU, F. "A Unified Approach to On-line Network
Modeling for Security Analysis". IEEE-IFAC pp 215-221.
1985.
- 32 - LEITE DA SILVA, A.M.; DO COUTO FILHO, M.B.; CANTERA, J.M.C.
"Tracking, Dynamic and Hybrid Power System State
Estimators". Ninth Power Systems Computation Conference
(9^o PSCC), Cascais Portugal, pp 353-539, 1987.
- 33 - DO COUTTO FILHO, M.B, LEITE DA SILVA, A.M, CANTERA, J.M.
C., DA SILVA R.A. "Depuração de informações através da
Estimação Dinâmica de Estado em Sistemas de Potência".
7^o CBA, Vol 2, São José dos Campos, SP, pp 807-816.
1988.
- 34 - GUIMARÃES, G.C. "Despacho de Geração em Tempo Real dos
Sistemas Elétricos de Potência". Dissertação de Mestrado,
UFSC, EEL, Florianópolis, Santa Catarina, Agosto, 1984.

- 35 - GUELFÍ, AGUILLAR, A. "Despácho de Geração para o Controle em Tempo Real dos Sistemas de Potência". Tese de M.Sc. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1986.
- 36 - CLEMENTS, K.A., WOLLENBERG, B.F. "An Algorithm for Observability Determination in Power System State Estimation". IEEE-PES Summer Meeting., 1975, California.
- 37 - SIMÕES COSTA , A.J., ALFAYA DOS SANTOS, E. "Expansão de Subsistemas Observáveis usando métodos Combinatórios". VI Congresso Chileno de Ingenieria Eléctrica, Santiago de Chile, pp 52-57, 1985.
- 38 - SERNA, V. "Determinação de Alternativas de Controle via Mudanças de Topologia da Rede para alívio de sobrecargas em Tempo Real". Tese de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1987.
- 39 - CAMPAGNOLO, J.M. "Estudos sobre Seleção Automática de Contingências em Tempo Real para Sistemas de Potência". Tese de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1984.
- 40 - AHO, A.V., HOPCROFT, J.E., ULLMAN, J.D. "Data Structures and Algorithms". Addison-Wesley Publishing Co. 1987.

APÊNDICE A

PRINCIPAIS DEFINIÇÕES, CONCEITOS E TERMINOLOGIAS

ADOTADAS NO PRESENTE TRABALHO

As principais definições e termos, apresentados a seguir, visam evitar falsas interpretações e permitir estabelecer a ligação entre os diversos conceitos matemáticos e a nomenclatura utilizada em Sistemas de Potência.

DISPOSITIVO LÓGICO: É um componente, de um sistema qualquer, que pode assumir unicamente dois estados que são mutuamente excludentes. Isto é, se o componente se encontrar num dos estados não poderá se encontrar ao mesmo tempo no outro.

O termo lógico tem suas origens nos tratados de LÓGICA MATEMÁTICA [01] [02] [03] e significa que, para tais dispositivos, a aceitação de que um estado é possível de ser confirmado num dado instante, corresponde a supor, neste dado instante, que a proposição "O Dispositivo se encontra no estado X" só pode se manifestar verdadeira ou falsa. Isto porque se exclui desde o começo as possibilidades de que a proposição acima seja absurda ou provável. Deste modo se pode imediatamente separar as noções de Proposição e de Valor Lógico.

PROPOSIÇÃO: É um enunciado completo que tomado em bloco só poderá receber um ou outro valor lógico e jamais os dois.

VALOR LÓGICO: É o valor atribuído a uma proposição num dado instante, o qual só poderá ser verdadeiro ou falso.

A lógica que é construída a partir destas suposições é dita lógica das proposições bivalentes [04], ou simplesmente lógica proposicional.

DISPOSITIVOS LÓGICOS NUMA REDE ELÉTRICA: Os dispositivos lógicos numa rede elétrica são as Chaves, Seccionadores e Disjuntores, que nas redes de transmissão constituem, dentro das subestações, os elementos responsáveis pelas manobras capazes de alterar a topologia da rede.

As proposições básicas que podem ser construídas são as seguintes:

- 1) A Chave Seccionadora x está fechada entre os pontos i e j,
- 2) O Disjuntor y está fechado entre os pontos k e l.

Se o valor lógico destas proposições for verdadeiro os pontos i e j, bem como os pontos k e l, estão ligados entre si.

Se o valor lógico, ao contrário, for falso para tais proposições, significa que os pontos i e j, bem como k e l, não estão ligados entre si.

Neste trabalho se adotou a definição seguinte:

- 0 : Dispositivo Lógico aberto e
- 1 : Dispositivo Lógico fechado.

NÓ: É a menor divisão da rede de potência e corresponde aos pontos entre os quais se conecta um Dispositivo Lógico. Para o caso da Configuração das Subestações o NÓ corresponde aos

Vértices do Grafo parcial associado a mesma.

BARRA: É uma secção de uma subestação que contém um conjunto de nós conectados através de Dispositivos Lógicos fechados. Para o caso da Configuração da Rede a Barra corresponde aos vértices do Grafo Global.

EQUIPAMENTO SÉRIE: É um elemento que, com sua impedância, une duas subestações. Pode corresponder fisicamente a um Condensador série, a uma linha de transmissão, a um transformador, ou um transformador defasador. Para o caso da Configuração da Rede os Equipamentos Série correspondem aos arcos do Grafo.

EQUIPAMENTO DERIVAÇÃO ("SHUNT"): É um elemento que, com sua impedância, conecta uma barra com um nó terra. Pode corresponder fisicamente a um capacitor, um reator paralelo, uma unidade de geração, uma carga, etc.

BARRA ELÉTRICA: Uma barra é dita elétrica quando ao conjunto dos nós que nela estão reunidos está conectado pelo menos um equipamento série e outro equipamento qualquer derivação ou série.

BARRA ISOLADA: É uma barra que não atende à definição de Barra Elétrica. Isto é, é uma barra que não é elétrica.

REFERÊNCIAS

- 01 - WHITEHEAD, A.N. RUSSEL, B. "Principia Mathematica". 3 Vol, Cambridge. 1st Ed 1910. USA.

- 02 - HILBERT, D. ACKERMANN, W. "Grundzuge Der Theoretischen Logik". Berlin, 1928.
- 03 - HILBERT, D. BERNAYS, P. "Grundslagen der Mathematic", 2 Vol, Berlin. 1934.
- 04 - CHAUVINEAU, J. "La Logique Moderne". Press Universitaires de France. Paris. 1974.

APÊNDICE B

PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA O CARREGAMENTO DA BASE DE DADOS ESTÁTICA

B:1 DADOS DE ENTRADA

Uma vez numerados os Nós das Subestações e os Dispositivos Lógicos se pode construir o arquivo de entrada para o programa que carrega a Base de Dados Estática.

O arquivo de entrada é constituído como ilustrado abaixo para o Sistema exemplo Didático apresentado no Capítulo VI (item 6.3).

00 Modelo de Rede Didática

01 NSE 2 NNT 4

NONT1 2 NONT2 4 NONT3 3 NONT4 3

04 SUBESTAÇÃO No 1

05 NÍVEL DE TENSÃO No 1

DL 1 LIN 1 TF 1 SH 0 UG 0 CG 0

07 DL = DL1 NOA = 101 NOB = 102

08 LIN = L11 NOA = 101 NOB = 301

09 TRF = T11 NOA = 102 NOB = 201

05 NÍVEL DE TENSÃO No 2

DL 3 LIN 2 TF 1 SH 1 UG 0 CG 0

07 DL = DL2 NOA = 201 NOB = 202

07 DL = DL3 NOA = 201 NOB = 203

07 DL = DL4 NOA = 204 NOB = 201

08 LIN = L22 NOA = 202 NOB = 402

08 LIN = L32 NOA = 203 NOB = 403

09 TRF = T12 NOA = 201 NOB = 102

10 SHN = SH1 NOA = 204

04 SUBESTAÇÃO No 2

05 NÍVEL DE TENSÃO No 1

DL 2 LIN 1 TF 1 SH 0 UG 0 CG 1

07 DL = DL5 NOA = 301 NOB = 302

07 DL = DL6 NOA = 302 NOB = 303

08 LIN = L13 NOA = 301 NOB = 101

09 TRF = T23 NOA = 302 NOB = 401

12 CG = CG1 NOA = 303

05 NÍVEL DE TENSÃO No 2

DL 2 LIN 2 TF 1 SH 0 UG 0 CG 0

07 DL = DL7 NOA = 401 NOB = 402

07 DL = DL8 NOA = 401 NOB = 403

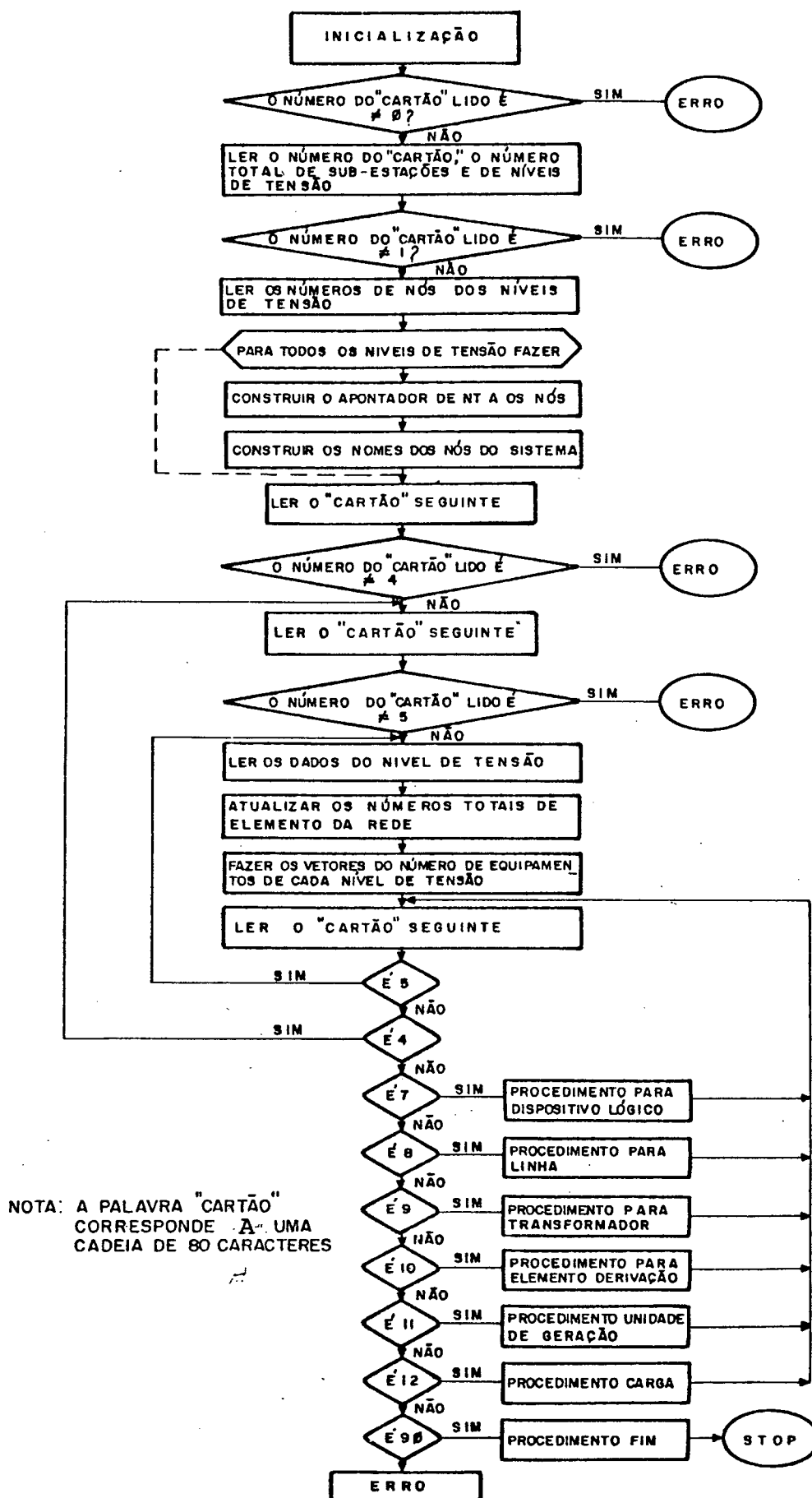
08 LIN = L24 NOA = 402 NOB = 202

08 LIN = L34 NOA = 403 NOB = 203

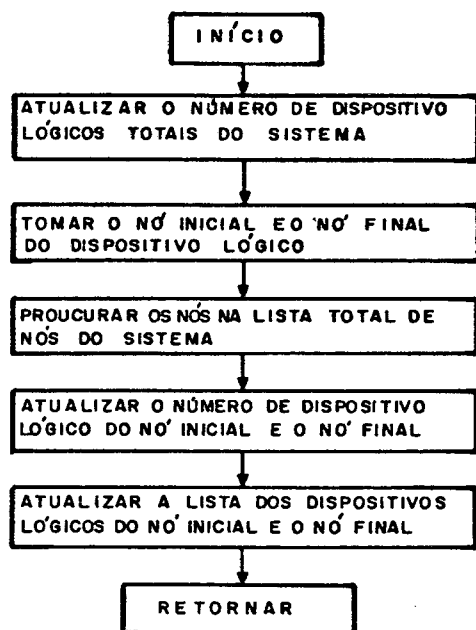
09 TRF = T22 NOA = 401 NOB = 302

90

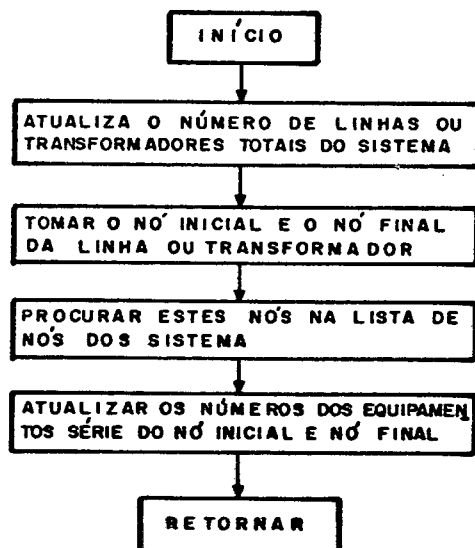
B:2 DIAGRAMA DE FLUXO DO PROGRAMA PARA CARREGAR A BASE DE DADO ESTÁTICA



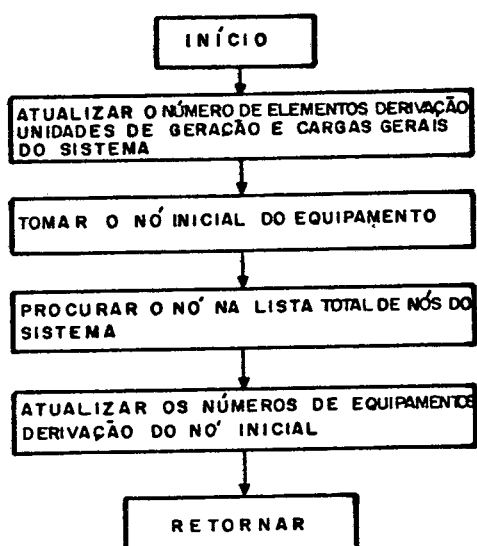
PROCEDIMENTO PARA DISPOSITIVO LÓGICO.



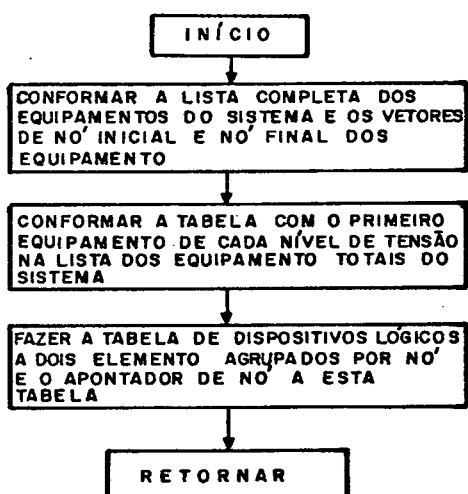
PROCEDIMENTO PARA LINHAS E TRANSFORMADORES



PROCEDIMENTO PARA ELEMENTOS DERIVAÇÃO UNIDADE DE GERAÇÃO E CARGA.



PROCEDIMENTO FINAL.



B:3 DADOS DE SAÍDA DO PROGRAMA

Os dados de Saída do Programa é a Base de Dado Estática conveniente para os configuradores trabalhar. Um exemplo desta base de Dados já montada, foi dada no item 6.3.3 deste trabalho.

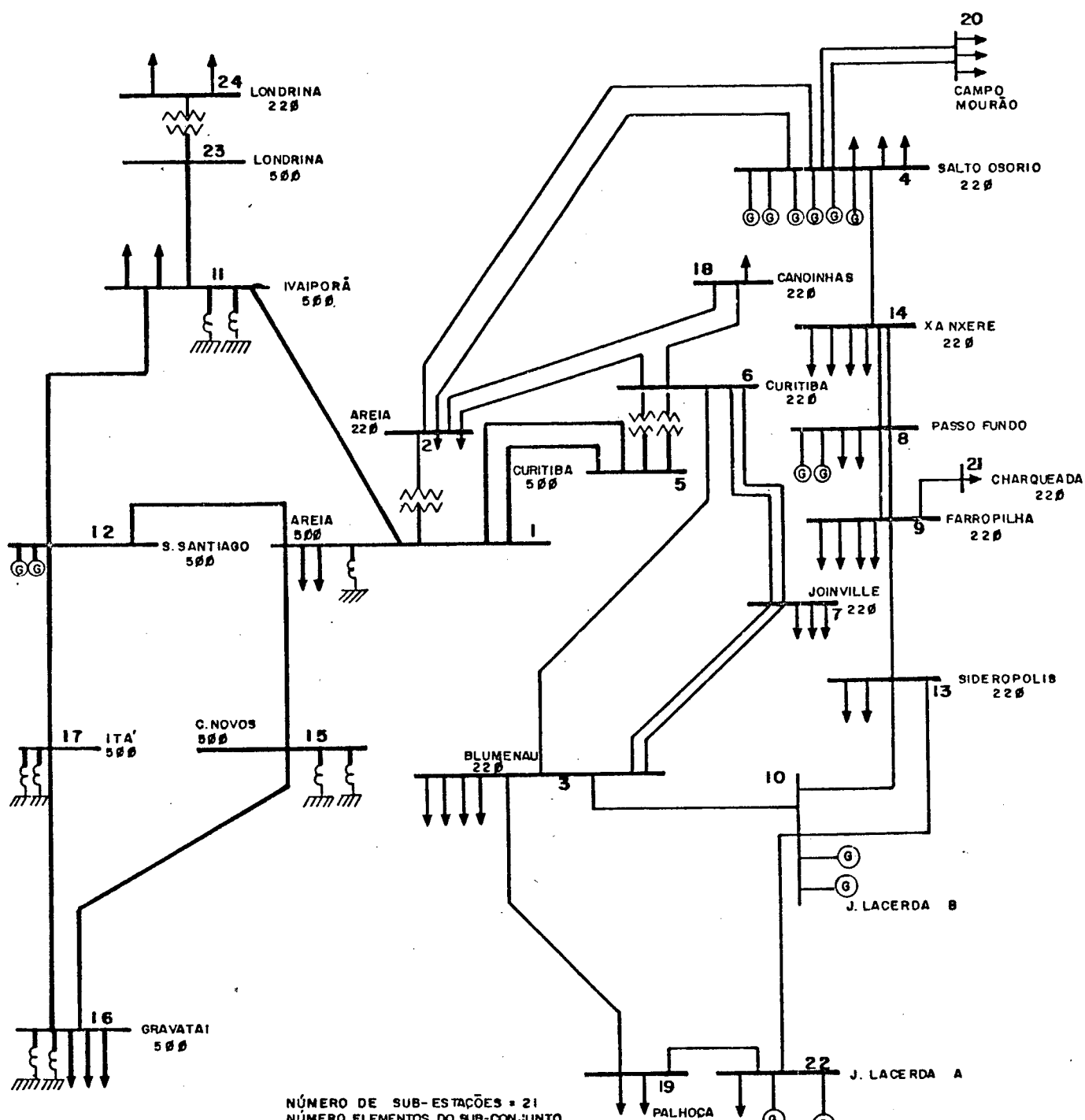
APÊNDICE C

REDE DE 500/230 KV DO SUL DO BRASIL

C:1 OBJETIVOS DESTE APÊNDICE

Neste Apêndice são apresentados o Diagrama Unifilar da Rede 500/230 KV do Sul do Brasil (Rede gentilmente cedida pela ELETROSUL para este trabalho), os Diagramas Unifilares completos das Subestações Salto Osório e Areia e uma amostra do arquivo com os dados de Entrada desta rede ao programa que carrega a Base de Dados Estática. O tamanho desta rede é o seguinte: 21 Subestações, 24 elementos no Subconjunto Nível de Tensão, 708 Dispositivos Lógicos, 585 Nós, 35 Linhas, 4 Transformadores, 41 Cargas, 9 Reatores, e 14 Unidades de Geração.

C:2 DIAGRAMA UNIFILAR DA REDE 500/230 KV DO SUL DO BRASIL

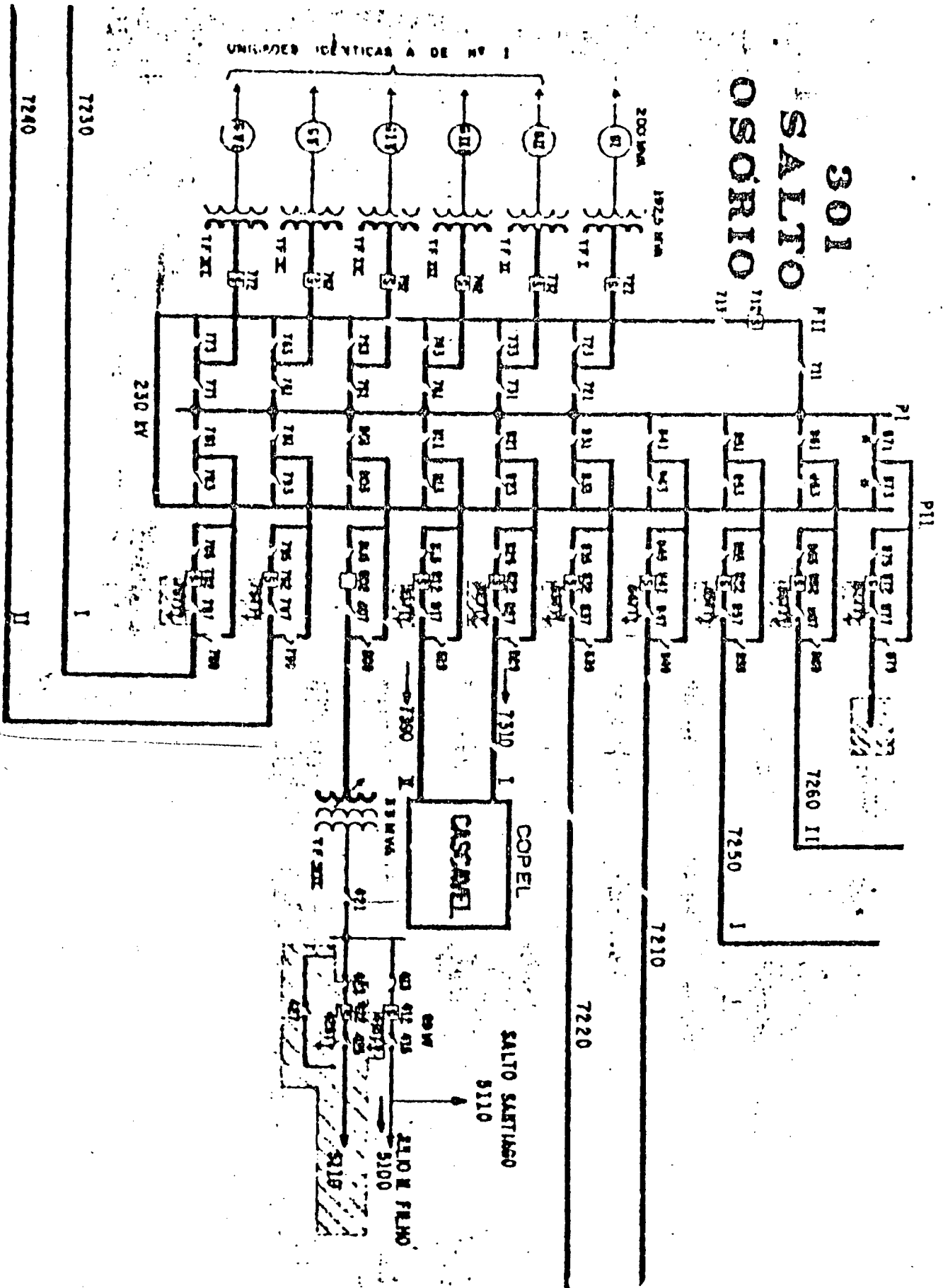


NÚMERO DE SUB-ESTAÇÕES = 21
 NÚMERO ELEMENTOS DO SUB-CONJUNTO
 NÍVEIS DE TENSÃO = 24
 NÚMERO DE DISPOSITIVOS LÓGICOS = 708
 NÚMERO DE NÓS = 585
 NÚMERO DE LINHAS = 35
 NÚMERO DE TRANSFORMADORES = 4
 NÚMERO DE CARGAS = 41
 NÚMERO DE REATORES = 9
 NÚMERO DE UNIDADES DE GERAÇÃO = 14

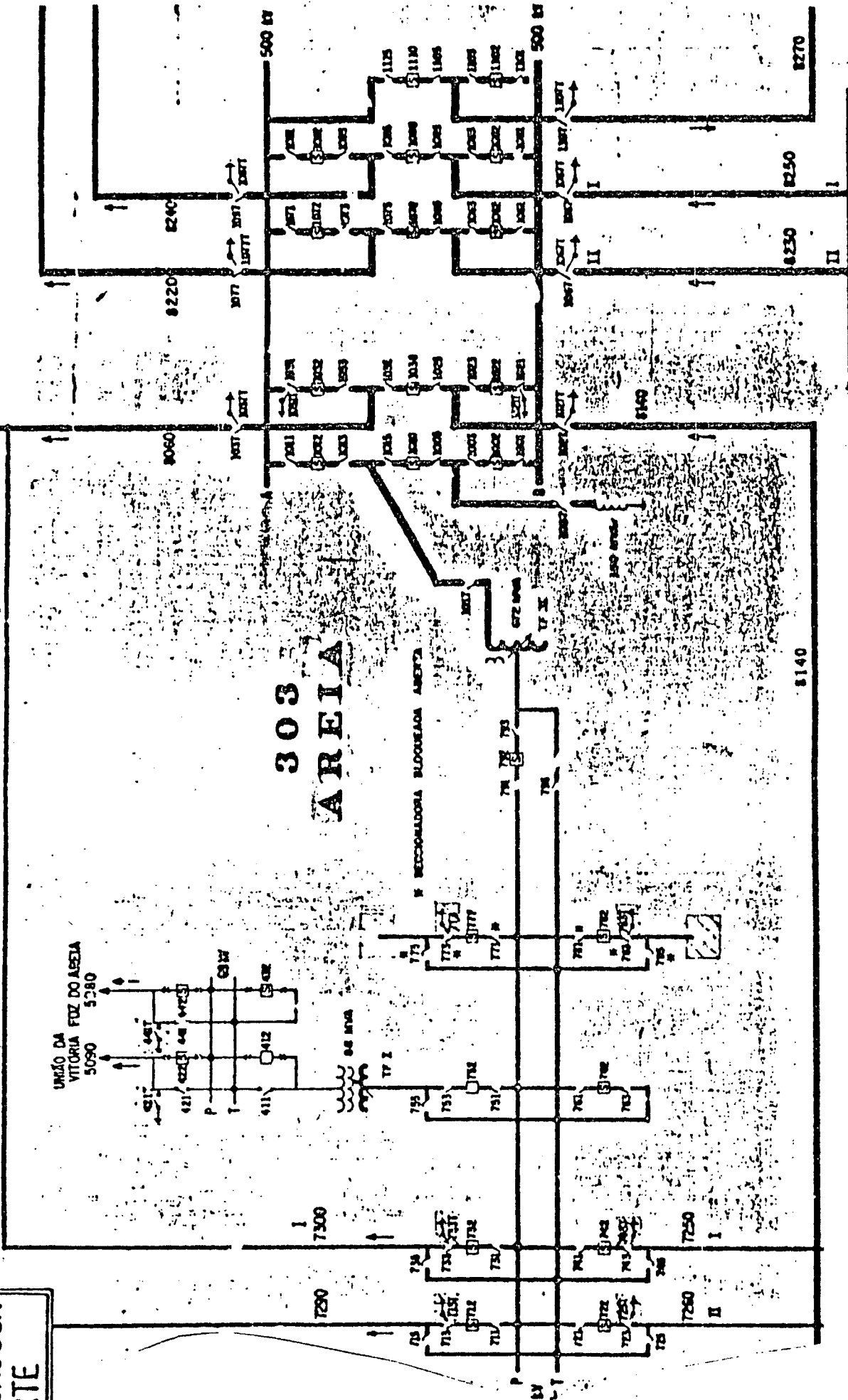
CONVENÇÕES

(G) GERADOR
 ↑ CARGA
 ⚡ REATOR
 — REDE 500 KV
 — REDE 220 KV

C:3 DIAGRAMA UNIFILAR DAS SUBESTAÇÕES DE SALTO OSÓRIO E AREIA.



ANTA GROSSA
NORTE
- COPEL



G. BENTO MUNHOZ
DA ROCHA NETO

C:4 DADOS DE ENTRADA PARA CARREGAR A BASE DE DADOS ESTÁTICA
DA REDE 500/230 KV DO SUL DO BRASIL

LEO FREDES DADOS A1 VM/SP R4 PUT3602+ SLC4CE

0 MODELO DE RED SUL DO BRASIL

1 NSE 21 NNT 24

ND1	48	NND2	25	NND3	33	NND4	47	NND5	22	NND6	30	NND7	24
ND8	35	NND9	37	NND10	26	NND11	30	NND12	28	NND13	19	NND1	34
ND15	13	NND16	22	NND17	13	NND18	12	NND19	16	NND20	15	NND2	12
ND22	19	NND23	8	NND24	13								

4 SUBESTACAO AREIA

5 NIVEL DE TENSÃO AREIA 500

DL	51	LN	E	IF	I	SH	1	UG	0	CG	2
7		DISLOG = 1			NDPX		103	NDRM			106
7		DISLOG = 2			NDPX		101	NDRM			104
7		DISLOG = 3			NDPX		104	NDRM			105
7		DISLOG = 4			NDPX		105	NDRM			106
7		DISLOG = 5			NDPX		106	NDRM			107
7		DISLOG = 6			NDPX		107	NDRM			108
7		DISLOG = 7			NDPX		108	NDRM			109
7		DISLOG = 8			NDPX		109	NDRM			110
7		DISLOG = 9			NDPX		110	NDRM			111
7		DISLOG = 10			NDPX		111	NDRM			112
7		DISLOG = 11			NDPX		109	NDRM			112
7		DISLOG = 12			NDPX		113	NDRM			116
7		DISLOG = 13			NDPX		101	NDRM			114
7		DISLOG = 14			NDPX		114	NDRM			115
7		DISLOG = 15			NDPX		115	NDRM			116
7		DISLOG = 16			NDPX		116	NDRM			117
7		DISLOG = 17			NDPX		117	NDRM			118
7		DISLOG = 18			NDPX		118	NDRM			119
7		DISLOG = 19			NDPX		119	NDRM			120
7		DISLOG = 20			NDPX		120	NDRM			121
7		DISLOG = 21			NDPX		121	NDRM			122
7		DISLOG = 22			NDPX		122	NDRM			123
7		DISLOG = 23			NDPX		123	NDRM			124
7		DISLOG = 24			NDPX		124	NDRM			125
7		DISLOG = 25			NDPX		125	NDRM			126
7		DISLOG = 26			NDPX		126	NDRM			127
7		DISLOG = 27			NDPX		127	NDRM			128
7		DISLOG = 28			NDPX		128	NDRM			129
7		DISLOG = 29			NDPX		129	NDRM			130
7		DISLOG = 30			NDPX		130	NDRM			131
7		DISLOG = 31			NDPX		131	NDRM			132
7		DISLOG = 32			NDPX		132	NDRM			133
7		DISLOG = 33			NDPX		133	NDRM			134
7		DISLOG = 34			NDPX		134	NDRM			135
7		DISLOG = 35			NDPX		135	NDRM			136
7		DISLOG = 36			NDPX		136	NDRM			137
7		DISLOG = 37			NDPX		137	NDRM			138
7		DISLOG = 38			NDPX		138	NDRM			139
7		DISLOG = 39			NDPX		139	NDRM			140
7		DISLOG = 40			NDPX		140	NDRM			141
7		DISLOG = 41			NDPX		141	NDRM			142
7		DISLOG = 42			NDPX		142	NDRM			143
7		DISLOG = 43			NDPX		143	NDRM			144
7		DISLOG = 44			NDPX		144	NDRM			145
7		DISLOG = 45			NDPX		145	NDRM			146
7		DISLOG = 46			NDPX		146	NDRM			147
7		DISLOG = 47			NDPX		147	NDRM			148
7		DISLOG = 48			NDPX		148	NDRM			149
7		DISLOG = 49			NDPX		149	NDRM			150
7		DISLOG = 50			NDPX		150	NDRM			151
7		DISLOG = 51			NDPX		151	NDRM			152
7		DISLOG = 52			NDPX		152	NDRM			153
7		DISLOG = 53			NDPX		153	NDRM			154
7		DISLOG = 54			NDPX		154	NDRM			155
7		DISLOG = 55			NDPX		155	NDRM			156
7		DISLOG = 56			NDPX		156	NDRM			157
7		DISLOG = 57			NDPX		157	NDRM			158
7		DISLOG = 58			NDPX		158	NDRM			159
7		DISLOG = 59			NDPX		159	NDRM			160
7		DISLOG = 60			NDPX		160	NDRM			161
7		DISLOG = 61			NDPX		161	NDRM			162
7		DISLOG = 62			NDPX		162	NDRM			163
7		DISLOG = 63			NDPX		163	NDRM			164
7		DISLOG = 64			NDPX		164	NDRM			165
7		DISLOG = 65			NDPX		165	NDRM			166
7		DISLOG = 66			NDPX		166	NDRM			167
7		DISLOG = 67			NDPX		167	NDRM			168
7		DISLOG = 68			NDPX		168	NDRM			169
7		DISLOG = 69			NDPX		169	NDRM			170
7		DISLOG = 70			NDPX		170	NDRM			171
7		DISLOG = 71			NDPX		171	NDRM			172
7		DISLOG = 72			NDPX		172	NDRM			173
7		DISLOG = 73			NDPX		173	NDRM			174
7		DISLOG = 74			NDPX		174	NDRM			175
7		DISLOG = 75			NDPX		175	NDRM			176
7		DISLOG = 76			NDPX		176	NDRM			177
7		DISLOG = 77			NDPX		177	NDRM			178
7		DISLOG = 78			NDPX		178	NDRM			179
7		DISLOG = 79			NDPX		179	NDRM			180
7		DISLOG = 80			NDPX		180	NDRM			181
7		DISLOG = 81			NDPX		181	NDRM			182
7		DISLOG = 82			NDPX		182	NDRM			183
7		DISLOG = 83			NDPX		183	NDRM			184
7		DISLOG = 84			NDPX		184	NDRM			185
7		DISLOG = 85			NDPX		185	NDRM			186
7		DISLOG = 86			NDPX		186	NDRM			187
7		DISLOG = 87			NDPX		187	NDRM			188
7		DISLOG = 88			NDPX		188	NDRM			189
7		DISLOG = 89			NDPX		189	NDRM			190
7		DISLOG = 90			NDPX		190	NDRM			191
7		DISLOG = 91			NDPX		191	NDRM			192
7		DISLOG = 92			NDPX		192	NDRM			193
7		DISLOG = 93			NDPX		193	NDRM			194
7		DISLOG = 94			NDPX		194	NDRM			195
7		DISLOG = 95			NDPX		195	NDRM			196
7		DISLOG = 96			NDPX		196	NDRM			197
7		DISLOG = 97			NDPX		197	NDRM			198
7		DISLOG = 98			NDPX		198	NDRM			199
7		DISLOG = 99			NDPX		199	NDRM			200
7		DISLOG = 100			NDPX		200	NDRM			201
7		DISLOG = 101			NDPX		201	NDRM			202
7		DISLOG = 102			NDPX		202	NDRM			203
7		DISLOG = 103			NDPX		203	NDRM			204
7		DISLOG = 104			NDPX		204	NDRM			205
7		DISLOG = 105			NDPX		205	NDRM			206
7		DISLOG = 106			NDPX		206	NDRM			207
7		DISLOG = 107			NDPX		207	NDRM			208
7		DISLOG = 108			NDPX		208	NDRM			209
7		DISLOG = 109			NDPX		209	NDRM			210
7		DISLOG = 110			NDPX		210	NDRM			211
7		DISLOG = 111			NDPX		211	NDRM			212
7		DISLOG = 112			NDPX		212	NDRM			213
7		DISLOG = 113			NDPX		213	NDRM			214
7		DISLOG = 114			NDPX		214	NDRM			215
7		DISLOG = 115			NDPX		215	NDRM			216
7		DISLOG = 116			NDPX		216	NDRM			217
7		DISLOG = 117			NDPX		217	NDRM			218
7		DISLOG = 118			NDPX		218	NDRM			219
7		DISLOG = 119			NDPX		219	NDRM			220
7		DISLOG = 120			NDPX		220	NDRM			221
7		DISLOG = 121			NDPX		221	NDRM			222
7		DISLOG = 122			NDPX		222	NDRM			223
7		DISLOG = 123			NDPX		223	NDRM			224
7		DISLOG = 124			NDPX		224	NDRM			225
7		DISLOG = 125			NDPX		225	NDRM			226
7		DISLOG = 126			NDPX		226	NDRM			227
7		DISLOG = 127			NDPX		227	NDRM			228
7		DISLOG = 128			NDPX		228	NDRM			229
7		DISLOG = 129			NDPX		229	NDRM			230
7		DISLOG = 130			NDPX		230	NDRM			231
7		DISLOG = 131			NDPX		231	NDRM			232
7		DISLOG = 132			NDPX		232	NDRM			233
7		DISLOG = 133			NDPX		233	NDRM			234
7		DISLOG = 134			NDPX		234	NDRM			235
7		DISLOG = 135			NDPX		235	NDRM			236
7		DISLOG = 136			NDPX		236	NDRM			237
7		DISLOG = 137			NDPX		237	NDRM			238
7		DISLOG = 138			NDPX		238	NDRM			239
7		DISLOG = 139			NDPX		239	NDRM			240
7		DISLOG = 140			NDPX		240	NDRM			241
7		DISLOG = 141			NDPX		241	NDRM			242
7		DISLOG = 142			NDPX		242	NDRM			243
7		DISLOG = 143			NDPX		243	NDRM			244
7		DISLOG = 144			NDPX		244	NDRM			245
7		DISLOG = 145			NDPX		245	NDRM			246
7		DISLOG = 146			NDPX		246	NDRM			247
7		DISLOG = 147			NDPX		247	NDRM			248
7		DISLOG = 148			NDPX		248	NDRM			249
7		DISLOG = 149			NDPX		249	NDRM			250
7		DISLOG = 150			NDPX		250	NDRM			251
7		DISLOG = 151									